

490 | April 1989

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Yaozong Zhou

**Bestimmung der im Seegang
zusätzlich erforderlichen
Antriebsleistung von Schiffen**

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Bestimmung der im Seegang zusätzlich erforderlichen Antriebsleistung von Schiffen

Yaozong Zhou, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1989

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 490

**Bestimmung der im Seegang zusätzlich
erforderlichen Antriebsleistung von Schiffen**

von

Yaozong Zhou

April 1989

ISBN 3 - 89220 - 490 - X

Copyright Institut für Schiffbau
 Universität Hamburg
 Lämmersieth 90
 D-2000 Hamburg 60

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Existierende Verfahren zur Berechnung des Zusatzwiderstandes	1
2.1	Empirische Verfahren	1
2.2	Theoretische Methoden	2
3	Theoretische Berechnung der zeitlich gemittelten Längskraft an Schiffen im Seegang	3
3.1	Zielsetzung	3
3.2	Bestimmung des Zusatzwiderstandes in längeren Wellen	3
3.3	Einflußder Längsbewegung auf die mittlere Längskraft	6
3.4	Der durch das Ruder induzierte Widerstand	9
3.5	Abschätzung des Zusatzwiderstandes eines Schiffes in kurzen Wellen	9
3.6	Zusatzwiderstand im natürlichen Seegang	10
3.7	Erhöhung des Schiffswiderstandes durch Wind	11
3.8	Mehrleistungsbedarf von Schiffen im Seegang	13
4	Das Programmsystem <i>SIS</i>	15
5	Berechnungsergebnisse und Vergleich mit Versuchen	15
6	Zusammenfassung	26
7	Literaturverzeichnis	27

1 Einleitung

Aussagen über den Zusatzwiderstand, die erforderliche Mehrleistung bzw. den Verlust an Fahrtgeschwindigkeit von Schiffen im Seegang sind von großer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit. Bei mäßigem Seegang beruht der Geschwindigkeitsverlust z. B. bei konstantem Propellerdrehmoment auf einer Erhöhung des Widerstandes sowie einer Verschlechterung des Propulsionswirkungsgrades durch höhere Propellerbelastung, die von den Wellen und den daraus resultierenden Bewegungen hervorgerufen werden. Bei stärkerem Seegang muß die Geschwindigkeit zusätzlich durch Herabsetzen des Drehmoments verringert werden, um Schäden der Antriebsanlage (Überlastung, Überdrehzahlen durch Propeller-austauschen), des Schiffes (Slamming, Whipping) oder der Ladung (große Rollamplituden) zu verringern und um gefährliche Betriebszustände (Querschlagen, Kentern) zu vermeiden.

Um den Zusatzwiderstand im Seegang quantitativ zu erfassen, kann man Modellschleppversuche in regelmäßigen Wellen verschiedener Länge durchführen. Versuchsergebnisse zeigen einen erheblichen Zusatzwiderstand um Verhältnisse Wellenlänge zu Schiffslänge $\lambda/L = 1$, während große Wellenlängen wenig Einfluß auf den Widerstand haben.

Der zeitliche Mittelwert des Zusatzwiderstandes eines Schiffes durch den Seegang ist in regelmäßigen Wellen mit guter Näherung dem Quadrat der Wellenhöhe und damit der Wellenenergie proportional, wie durch Modellversuche bestätigt wurde [1, 2]. Zur Berechnung des Zusatzwiderstandes eines Schiffes in natürlichem Seegang addiert man die Einflüsse der verschiedenen Wellenkomponenten, aus denen sich die gesamte Seegangsenergie zusammensetzt. Dazu muß man zunächst den Mittelwert des Zusatzwiderstandes $\overline{R_s}$ in einer harmonischen Welle bestimmen. Eine exakte analytische Berechnung ist kompliziert; deshalb muß man Näherungsverfahren benutzen.

2 Existierende Verfahren zur Berechnung des Zusatzwiderstandes

2.1 Empirische Verfahren

Für eine erste schnelle Erfassung des Zusatzwiderstandes und der Antriebsleistung eines Schiffes im Seegang wurden empirische Verfahren entwickelt, die auf einer systematischen Auswertung und Verallgemeinerung von Modellversuchsergebnissen beruhen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, in einem sehr frühen Stadium der Projektierung von Schiffen Aussagen über Einflüsse von Parametervariationen auf das Widerstandsverhalten zu machen.

Von *Jinkine und Ferdinande* [3] wurde ein relativ einfaches und schnell zu handhabendes Verfahren zur Ermittlung des seegangsbedingten Zusatzwiderstandes $\overline{R_s}$ für den Fall regelmäßiger und unregelmäßiger Wellen angegeben. Es ist nur auf schlanke Schiffe in genau von vorn kommenden Wellen beschränkt.

Das Verfahren von *Moor und Murdy* [4] basiert auf den Ergebnissen einer umfangreichen Modellserie von 34 Schiffsmoellen. Diese Modelle wurden in regelmäßigen Wellen und teilweise auch im unregelmäßigen Seegang untersucht. Die Ergebnisse sind dargestellt als Regressionsgleichungen abhängig von C_B , L/B , L/T , LCB , k_{yy}/L und F_n , wobei die Koeffizienten von der *Beaufortzahl* und der Schiffslänge abhängig angegeben werden.

Ein weiteres empirisches Verfahren, das für eine breitere Formparametervariation eingesetzt werden kann, wurde von *Schiffrin* [5] ebenfalls auf der Grundlage von Modelluntersuchungen entwickelt. Im Gegensatz zu dem vorher beschriebenen Verfahren ist diese Methode auch bei schrägem Seegang anwendbar.

Shintani [6] hat eine einfache Regressionsformel zur Bestimmung der Widerstandszunahme im von vorne kommenden unregelmäßigen Seegang veröffentlicht. Die Formel ist durch Regressionsanalyse von systematischen Berechnungen nach *Maruo's* Methode bestimmt worden. Der Koeffizient des Zusatzwiderstandes wird dabei als Funktion der Froudezahl F_n , der dimensionslosen Wellenperiode $T' = T\sqrt{g/L}$ und der Formparameter des Unterwasserschiffes angesetzt.

2.2 Theoretische Methoden

Die theoretische Berechnung des Zusatzwiderstandes in regelmäßigen Wellen setzt die Berechnung der Schiffsbewegungen voraus. Deshalb wird häufig in Programmen zur Ermittlung der Bewegungen und Belastungen auch der seegangsbedingte Zusatzwiderstand berechnet. Die üblicherweise dazu angewendeten Methoden beruhen auf einer potentialtheoretische Berechnung der Schiffsumströmung in Wellen und der daraus folgenden Druckverteilung auf der Schiffsoberfläche.

Eine der ersten Erklärungen des Zusatzwiderstandes stammt von *Kreitner* [7]. Er traf die Annahme, daß der Zusatzwiderstand hauptsächlich durch die Wellenreflektion am Vorschiff erzeugt wird, und entwickelte daraus eine Näherungsformel für langsame Schiffe, in der aber die Stampf- und Tauchbewegungen nicht berücksichtigt wurden.

Havelock [8] hat gezeigt, daß der Anteil des Zusatzwiderstandes infolge Stampf- und Tauchbewegungen viel größer als der Anteil infolge der Wellenreflexion ist, und daß der Zusatzwiderstand wesentlich von der Phasendifferenz zwischen Tauch- und Stampfbewegung verursacht wird, welche stark von den Dämpfungskräften in diesem System abhängt.

Maruo [9] hat eine Singularitäten-Methode zur Berechnung des Widerstandes im Seegang aufgestellt, die später von ihm und anderen weiterentwickelt worden ist [10]. Er benutzte die *Kochin*-Funktion, die die Quellverteilung auf der Oberfläche des Schiffes darstellt, um das komplizierte Problem der Berechnung des Strömungspotentials zu lösen. Aus seinen Ergebnissen ergibt sich, daß vor allem die Stampfbewegung für den Zusatzwiderstand verantwortlich ist und daß die Wirkung der reflektierten Wellen bei $\lambda/L \geq 1$ von untergeordneter Bedeutung ist. Aus seinen Ergebnissen [10] für schräglaufenden Seegang ergibt sich, daß der Anteil infolge Querbewegung ebenfalls von untergeordneter Bedeutung ist.

Gerritzma und Beukelman [11] haben aus dem Energiesatz eine relativ einfache, jedoch nur für von vorn kommenden Seegang anwendbare Formel für den Zusatzwiderstand abgeleitet.

Kholodilin und Yurkov [12] geben eine Methode an, bei der ebenfalls vom Energieerhaltungssatz ausgegangen wird. Für den Fall des in regelmäßigen Wellen mit der Geschwindigkeit v fahrenden Schiffes ist die Gesamtenergie E im betrachteten Flüssigkeitsgebiet eine periodische Funktion der Zeit t .

Salvesens Verfahren [13] erlaubt die Berechnung der Kräfte und der Momente zweiter Ordnung am Schiff in schräglaufenden regelmäßigen Wellen.

Boese [14] hat eine einfache Berechnungsmethode abgeleitet, bei der ein Anteil des Zusatzwiderstandes aus den vertikalen Relativbewegungen zwischen Schiff und Wasseroberfläche bestimmt wird. Ein anderer Anteil ergibt sich direkt aus den Tauch- und Stampfbewegungen.

Ausgehend von *Boeses* Methode hat *Faltinsen* [15] eine Formel abgeleitet, die zusätzlich den Einfluß der quadratischen Glieder der *Bernoulli*-Gleichung, den Einfluß der Quer- und Gierbewegungen und eine genauere Druckintegration durch Beachtung der Verlagerung der Schiffsoberfläche umfaßt.

3 Theoretische Berechnung der zeitlich gemittelten Längskraft an Schiffen im Seegang

3.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine allgemeingültige, praktisch anwendbare Methode zur rechnerischen Vorhersage des Zusatzwiderstandes und der zeitlich gemittelten Propellerkräfte infolge regelmäßiger Wellen und in natürlichem Seegang. Die Methode soll für beliebige Schiffsformen und beliebige Wellenlängen sowie für alle Wellenrichtungen geeignet sein.

Die auf das Schiff in Wellen wirkende zusätzliche gemittelte Längskraft ist als Produkt zweier Größen erster Ordnung darstellbar und besitzt somit einen von Null verschiedenen Mittelwert \bar{R}_s , der quadratisch von der Wellenamplitude abhängt. Er wird als Summe aus folgenden Anteilen dargestellt:

- Dem Hauptteil des Seegangswiderstands des Rumpfes R_{s0} , der nach dem Verfahren von Faltinsen [15] bestimmt wird und der bei mittleren und längeren Wellen groß ist,
- dem Reflektionsanteil R_{s1} , der nur in kurzen Wellen wesentlich ist,
- dem Anteil R_{LA} infolge der Längsbewegung,
- dem Reibungsanteil R_{RL} infolge der Orbitalbewegung des Wassers und der Längsbewegung des Schiffes,
- und dem durch das Ruder induzierten Widerstand R_{RU} .

Diese gemittelten Längskräfte werden mit dem Programm *ZWBF6G* berechnet. Es enthält dazu als wesentlichen Teil das Programm *BUEF6G* [16] zur Berechnung der Übertragungsfunktionen der Schiffsbewegungen. Die Ergebnisse können dann mit dem Programmsystem *SERVICE-SPEED* [17] weiterverarbeitet werden, um die im Seegang erreichbare Geschwindigkeit, den dazu erforderlichen Brennstoffverbrauch etc. zu bestimmen. Das Programm *SERVICE-SPEED* wurde erweitert, so daß es auch die Kräfte und Momente auf Ruder und Rumpf und den Einfluß von Wind berücksichtigt. Damit werden die Ergebnisse des Programms genauer, denn bisher berücksichtigte es nur zwei Freiheitsgrade der Schiffsbewegung (Tauch- und Stampfbewegung) und vernachlässigte eine Reihe von Termen.

Vor der Anwendung von *ZWBF6G* müssen mit dem Programm *YEUNGC* (eine geänderte Version des Programms *YEUNGA*) Masse, Dämpfung und erregende Kräfte der Schiffsquerschnitte bestimmt werden. Das System aus den Programmen *YEUNGC*, *ZWBF6G*, *SERVICE-SPEED* und *YPLOT* (zum Plotten der Übertragungsfunktionen) wird Programmsystem *SIS* (Schiff im Seegang) genannt.

3.2 Bestimmung des Zusatzwiderstandes in längeren Wellen

Zur Zeit wird die Streifenmethode als zweckmäßigstes Verfahren zur Berechnung der Bewegung und Belastung fahrender Schiffe im Seegang angesehen. Hierbei wird grundsätzlich angenommen, daß die Reaktion des Schiffes $Re(\hat{u} \cdot e^{i\omega_e t})$ auf die regelmäßige Welle $Re(\hat{\zeta}_w \cdot e^{i\omega_e t})$ mit der Begegnungs-Kreisfrequenz ω_e periodisch ist. Im folgenden bezeichnet " $\hat{\cdot}$ " eine komplexe Amplitude, Fettschrift eine Matrix (s. [16]).

Die theoretischen Grundlagen für die Berechnung der Bewegungen in 6 Freiheitsgraden sind überwiegend [18, 19] entnommen. Die praktische Durchführung erfolgt mit dem

Programm *BUEF6G* [16]. Übereinstimmend mit [16] werden auch hier zwei Koordinatensysteme benutzt: Das Inertialsystem ξ, η, ζ und das schiffsfeste System x, y, z (s. Bild 1.). In [16] wurde gezeigt, daß die Ergebnisse des Programms *BUEF6G* besser als Werte, die nach der sogenannten "gewöhnlichen Streifenmethode" (OSM) berechnet wurden, mit Messungen an Modellen übereinstimmen.

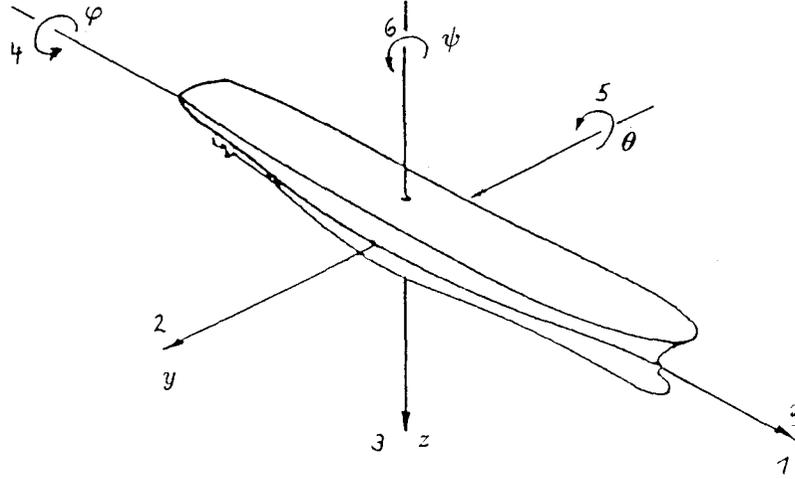


Bild 1. Schiffsfestes System

Das gesamte Geschwindigkeitspotential besteht aus stationären Anteilen $-v \cdot x + \phi_s$, die den Wellenwiderstand R_g im glatten Wasser bestimmen können, und aus dem zeitabhängigen Anteil $\hat{\phi} \cdot e^{i\omega t}$. Es wird angenommen, daß ϕ_s keinen Einfluß auf die Schiffsbewegungen infolge des Seegangs.

Die komplexe Amplitude (KA) des zeitabhängigen Geschwindigkeitspotentials $\hat{\phi}$ des durch das Schiff entstehenden Strömungsfeldes läßt sich allgemein in der Form

$$\hat{\phi} = \hat{\phi}_I + \hat{\phi}_D + \hat{\phi}_F \quad (1)$$

beschreiben.

Nach der Definition in [15] wird die KA des Geschwindigkeitspotentials der einfallenden Welle $\hat{\phi}_I$ wie folgt beschrieben:

$$\hat{\phi}_I = -ic \cdot \hat{\zeta}_w \cdot e^{-kz} \cdot e^{-ik(x \cos \mu - y \sin \mu)} \quad (2)$$

wobei c die Phasengeschwindigkeit der Elementarwelle ist.

$\hat{\phi}_D + \hat{\phi}_F$ ist die Störung der einfallenden Welle. Davon ist $\hat{\phi}_D$ das Potential infolge der Umströmung des in der Elementarwelle festgehaltenen Schiffes; es heißt Diffraktionspotential. $\hat{\phi}_F$ ist das Potential infolge der Schiffsbewegung $\hat{\mathbf{u}}$. Es wird aus 5 Anteilen infolge der Bewegung in 5 Freiheitsgraden (ohne die Längsbewegung) überlagert:

$$\hat{\phi}_F = \sum_{i=2}^6 \hat{\phi}_i \cdot \hat{\mathbf{u}}_i \quad (3)$$

mit

$$\hat{\mathbf{u}} = (\hat{\xi}, \hat{\eta}, \hat{\zeta}, \hat{\varphi}, \hat{\theta}, \hat{\psi})^T \quad (4)$$

Dabei bezeichnet "T" eine transponierte Matrix. Im folgenden bezeichnet der Index "G" (z. B. η_G) den Wert bzgl. des Schiffsschwerpunkt.

Entsprechend den hier definierten Koordinaten und Bezeichnungen wird die in [15] angegebene Formel umgeschrieben, aus der sich der Zusatzwiderstand infolge der Welle aus einer beliebigen Richtung μ mit der komplexen Amplitude $\hat{\zeta}_w$ ergibt:

$$\begin{aligned} \overline{R_{s0}} = & \underbrace{\frac{1}{2}\rho g \int_{WL} \overline{\zeta_{wr}^2} \cdot n_x dl}_{1} + \underbrace{\omega_e^2 m \cdot \overline{\eta_G} \cdot \overline{\psi} - \omega_e^2 \cdot m \overline{\zeta_G} \cdot \overline{\theta}}_2 \\ & - \rho \int_{S_B} \underbrace{\left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} |_m}_{3} \\ & + \underbrace{\left(\eta + x\psi + z\varphi \right) \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial t} - v \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \right) |_m + \left(\zeta - x\theta + y\varphi \right) \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial t} - v \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x} \right) |_m}_{4} n_x ds \quad (5) \end{aligned}$$

Darin bedeuten:

ζ_{wr}	Vertikale Relativbewegung zwischen der Welle und dem Schiff in der Wasserlinie: $\dot{\zeta}_{wr} = \dot{\zeta}_w - (\dot{\zeta} - x\dot{\theta} + y\dot{\eta}) _{z=0}$
m	Schiffsmasse
n_x	Richtungscosinus der Oberflächennormale in bezug auf X-Achse
S_B	Mittlere benetzte Oberfläche
\int_{WL}	Geschlossene Integration entlang der Wasserlinienkontur
$ _m$	Mittlere z-Koordinate der benetzten Oberfläche
—	Zeitlicher Mittelwert

Der 1. Anteil der Gleichung (5) berücksichtigt den Einfluß der wechselnden benetzten Oberfläche des Schiffes infolge der Relativbewegung zwischen Wellen und Schiff in der Wasserlinie. Das Integral ist dabei um die mittlere Wasserlinie auf beiden Schiffsseiten herum zu bilden. Der 2. Anteil, der im allgemeinen klein gegenüber dem 1. Anteil ist, resultiert aus dem Zusammenwirken periodischer Druckschwankungen auf dem gesamten Unterwasserschiff mit periodischen Drehbewegungen des Schiffes und damit Drehungen des Normalen-Vektors auf der Schiffsoberfläche. Der 3. Anteil gibt den Einfluß der quadratischen Glieder in der Bernoulli-Gleichung wieder. Der 4. Anteil beschreibt den Effekt des Druckes infolge der wechselnden momentanen Lage des Körpers. Die allen Spantwerte in 3.

und 4. Anteilen (z. B. die Werte von ϕ , $\partial\phi/\partial y$, $\partial\phi/\partial z$, ... auf beider Schiffsseiten am halben Tiefgang) sollten zuerst durch das Programm *YEUNGC* berechnet werden. Die Formel von *Boese* umfaßt nur den 1. und 2. Anteil der Gleichung (5).

Die in Formel (5) vorkommenden zeitabhängigen Größen (z. B. ζ_{wr}) schwanken harmonisch mit der Begegnungsfrequenz ω_z : $\zeta_{wr} = \text{Re}(\hat{\zeta}_{wr} \cdot e^{i\omega_z t})$. Zeitliche Mittelwerte von Produkten solcher Größen werden nach folgender Formel bestimmt:

$$\begin{aligned} \overline{\text{Re}(\hat{a} e^{i\omega_z t}) \cdot \text{Re}(\hat{b} e^{i\omega_z t})} &= \overline{\text{Re}(\hat{a} e^{i\omega_z t} \cdot \frac{1}{2}(\hat{b} e^{i\omega_z t} + \hat{b}^* e^{-i\omega_z t}))} \\ &= \underbrace{\text{Re}(\frac{1}{2}\hat{a} \cdot \hat{b} \cdot e^{2i\omega_z t})}_0 + \underbrace{\text{Re}(\frac{1}{2}\hat{a} \cdot \hat{b}^*)}_{\text{Konstant}} = \frac{1}{2}\text{Re}(\hat{a} \cdot \hat{b}^*) \end{aligned} \quad (6)$$

Dabei bezeichnet “*” den konjugiert-komplexen Wert. Mit dem Ansatz kann der zeitliche Mittelwert des Zusatzwiderstands $\overline{R_{s0}}$ (5) bestimmt werden.

3.3 Einfluß der Längsbewegung auf die mittlere Längskraft

In dem hier benutzten Berechnungsverfahren werden alle Schiffsbewegungen als linear von der Wellenhöhe abhängig angenommen. Dies mag bei der Längsbewegung zweifelhaft sein, wenn das Schiff mit relativ hoher Geschwindigkeit in achterlichem Seegang fährt. Da solche Zustände jedoch gefährlich sein können, kann man davon ausgehen, daß selten mit so hoher Geschwindigkeit in achterlichem Seegang gefahren wird, daß die Nichtlinearität berücksichtigt werden müßte.

Die Untersuchungen von *Blume* [20] haben gezeigt, daß der Diffraktions- und der *Radiationsanteil* der Erregungskraft in x -Richtung vernachlässigbar ist, so daß nur der *Froude-Krilow-Anteil* der Längskräfte zu bestimmen ist. In [16] wurde mit dieser einfachen Methode die Übertragungsfunktion der Längsbewegung ξ_0 bestimmt. In [16] wurde aber auch der Einfluß des Propellers vernachlässigt sowie die Tatsache, daß sich das Schiff durch die periodischen Geschwindigkeitsänderungen verschieden lange auf der ansteigenden und der abfallenden Wellenflanke aufhält. Diese Einflüsse sollen deshalb hier untersucht werden.

Die Gleichgewichtsbedingung für ein Schiff, das oszillierende Längsbewegungen ausführt, lautet:

$$m^* \ddot{\xi}_0 = (1 - t) T(\tilde{v}_a) - R(\tilde{v}) - \Delta R \quad (7)$$

Hier sind:

m^*	Masse des Schiffes einschließlich der hydrodynamischen Masse für Längsbeschleunigung = $m + m_{11}$. Diese Größe wird nach einem Vorschlag von <i>Söding</i> bestimmt: $m^* = m + 2.7\rho\nabla^{5/3}/L^2$. Dabei bezeichnet ∇ das Verdrängungsvolumen, L die Schiffslänge.
$\ddot{\xi}_0$	Längsbeschleunigung
$T(\tilde{v}_a)$	Propellerschub abhängig von der momentanen Propeller-Anströmgeschwindigkeit
$R(\tilde{v})$	Widerstand im glatten Wasser bei der momentanen Geschwindigkeit

ΔR	Längskraft durch die Wellen (positiv nach hinten) in Abhängigkeit von der Lage des Schiffes relativ zu den Wellen
t	Sogziffer

Die Fortschrittsgeschwindigkeit \tilde{v}_a kann wie folgt geschrieben werden:

$$\tilde{v}_a = \underbrace{(1-w)v}_{v_a} + \underbrace{(1-w)\dot{\xi}_0}_{\Delta v_a} + v_o \quad (8)$$

wobei v_o die x-Komponente der Orbitalgeschwindigkeit der Welle am Ort des Propellers ist. Hierfür wird angesetzt: $z \simeq d/2$ (halber Tiefgang), $x \simeq -L/2$ (halbe Schiffslänge). w ist die Nachstromziffer.

Aus dem Potential der einfallenden Welle (1) folgt die KA der Orbitalgeschwindigkeit in x-Richtung:

$$\hat{v}_o = -\omega \hat{\zeta}_w \cdot e^{-kz} \cdot e^{-ikx \cos \mu} \quad (9)$$

$T(\tilde{v}_a)$ wird durch Taylor-Entwicklung um $v_a = (1-w)v$ bis zum quadratischen Glied angenähert:

$$T(v_a + \Delta v_a) = T(v_a) + \Delta \cdot v_a T'(v_a) + \frac{1}{2} (\Delta v_a)^2 \cdot T''(v_a) \quad (10)$$

$R(\tilde{v})$ wird ebenso durch Taylor-Entwicklung um v bis zum quadratischen Glied angenähert:

$$R(v + \dot{\xi}_0) = R(v) + \dot{\xi}_0 R'(v) + \frac{1}{2} \dot{\xi}_0^2 R''(v) \quad (11)$$

Mit dem Potential der Welle kann der Druckunterschied \hat{p} in der Welle gegenüber dem Druck in glattem Wasser berechnet werden (s. [21]). Statt eines Mittelwerts für \hat{p} über die Spantfläche $A(x)$ wird hier der Wert am Spantschwerpunkt mit den Koordinaten x , $y_x (= 0)$, z_x angesetzt. Er ergibt sich zu

$$\hat{p} = -\rho g \cdot e^{-kz_x} \cdot e^{-ik\xi \cos \mu} \cdot \hat{\zeta}_w \quad (12)$$

mit $\xi = x + \xi_0$.

Aus dem Druck folgt die erregende Wellenkraft in Längsrichtung zu

$$\begin{aligned} \Delta R &= \operatorname{Re} \left(- \int_L \hat{p} \cdot A'(x) \cdot e^{i\omega_e t} \cdot dx \right) = \operatorname{Re} \left(\int_L A(x) \cdot \frac{d\hat{p}}{dx} \cdot e^{i\omega_e t} dx \right) \\ &= \operatorname{Re} (\rho i \omega^2 \cos \mu \cdot \hat{\zeta}_w \cdot \int_L A(x) e^{-kz_x} \cdot e^{-ikx \cos \mu} dx \cdot e^{-ik\xi_0 \cos \mu} \cdot e^{i\omega_e t}) \end{aligned} \quad (13)$$

Mit

$$\widehat{\Delta R} = i\omega^2 \rho \cos \mu \cdot \hat{\zeta}_w \cdot \int_L A(x) \cdot e^{-kz_x} \cdot e^{-ikx \cos \mu} dx \quad (14)$$

wird die Formel (13) abgekürzt:

$$\Delta R = \text{Re}(\widehat{\Delta R} \cdot e^{-ik\xi_0 \cos \mu} \cdot e^{i\omega_e t}) \quad (15)$$

Setzt man diese Größen in die Bewegungsgleichung (7) mit $\xi_0 = \text{Re}(\hat{\xi}_0 e^{i\omega_e t})$ ein, so heben sich der stationäre Widerstand und der Schub auf:

$$\begin{aligned} \text{Re}(-\omega_e^2 m^* \hat{\xi}_0 \cdot e^{i\omega_e t}) &= \underbrace{(1-t)T(v_a) - R(v)}_0 + (1-t)\Delta v_a T'(v_a) - \hat{\xi}_0 R'(v) \\ &+ \frac{1}{2}(1-t)(\Delta v_a)^2 \cdot T''(v_a) - \frac{1}{2}\hat{\xi}_0^2 \cdot R''(v) - \text{Re}(\widehat{\Delta R} \cdot e^{-ik\xi_0 \cos \mu} \cdot e^{i\omega_e t}) \end{aligned} \quad (16)$$

Vernachlässigung der quadratischen Terme liefert $\hat{\xi}_0$:

$$-\omega_e^2 m^* \hat{\xi}_0 = i\omega_e \hat{\xi}_0 (1-t)(1-w)T'(v_a) + (1-t)\hat{v}_o T'(v_a) - i\omega_e \hat{\xi}_0 R'(v) - \widehat{\Delta R} \quad (17)$$

Daraus ergibt sich

$$\hat{\xi}_0 = \frac{(1-t)\hat{v}_o T'(v_a) - \widehat{\Delta R}}{-\omega_e^2 m^* - i\omega_e(1-t)(1-w)T'(v_a) + i\omega_e R'(v)} \quad (18)$$

Nachdem $\hat{\xi}_0$ bestimmt ist, kann die mittlere negative Längskraft infolge der Längsbewegung bestimmt werden aus der rechten Seite der Bewegungsgleichung (16) unter Berücksichtigung der quadratischen Terme. Der Mittelwert der linearen Terme fällt weg, und es ergibt sich aus (16):

$$\frac{1}{2}\overline{\hat{\xi}_0^2} R''(v) - \frac{1}{2}\overline{\Delta v_a^2} (1-t)T''(v_a) + \overline{\text{Re}(\widehat{\Delta R} \cdot e^{-ik\xi_0 \cos \mu} \cdot e^{i\omega_e t})} \quad (19)$$

Die hierin vorkommenden zeitlichen Mittel sind

$$\overline{\Delta v_a^2} = \frac{1}{2} |i\omega_e(1-w)\xi_0 + v_o|^2 \quad (20)$$

und

$$\overline{\hat{\xi}_0^2} = -\frac{1}{2}\omega_e^2 |\xi_0|^2 \quad (21)$$

Für kleines $k\xi_0$ wird

$$\begin{aligned} \overline{\text{Re}(\widehat{\Delta R} \cdot e^{-ik\xi_0 \cos \mu} \cdot e^{i\omega_e t})} &\simeq \overline{\text{Re}(\widehat{\Delta R}(1 - ik\xi_0 \cos \mu) \cdot e^{i\omega_e t})} \\ &= \overline{\text{Re}(\widehat{\Delta R}(-i)k \cos \mu \cdot \text{Re}(\hat{\xi}_0 e^{i\omega_e t}) \cdot e^{i\omega_e t})} \\ &= \text{Re}\left(-\frac{1}{2}ik \cos \mu \cdot \widehat{\Delta R} \cdot \hat{\xi}_0^*\right) \end{aligned} \quad (22)$$

Der 1. Anteil in (19) gibt den Einfluß der Krümmung der Widerstandskurve an; der 2. Anteil entspricht der Krümmung der K_T -Kurve des Propellers. Der 3. Anteil resultiert

aus der Geschwindigkeitsschwankung, weil das Schiff im allgemeinen verschieden lange auf der ansteigenden und der abfallenden Wellenflanke fährt. Die ersten zwei Anteile sind sehr klein; die Genauigkeit des 3. Anteils hängt von der Genauigkeit der Längsbewegung ξ ab. Weitere Untersuchungen zur Verbesserung der Bestimmung von ξ wären hier hilfreich.

Außerdem wurde der Zusatzreibungswiderstand R_{RL} infolge der Wechselwirkung zwischen der mittleren Fahrt des Schiffes und der Orbital-Bewegung der Wasserteilchen nach einer gängigen Formel für den Plattenreibungswiderstand bestimmt. Der Anteil ist klein.

3.4 Der durch das Ruder induzierte Widerstand

Der vom Ruder induzierte Widerstand R_{RU} hängt von der Quer- und Gierbewegung, der Drehzahl des Propellers, der Schiffsgeschwindigkeit und dem Seitenverhältnis des Ruders ab. Der Beiwert des induzierten Widerstandes kann in einfacher Weise aus dem Ruderauftrieb bestimmt werden. Dafür muß man zuerst die mittlere Anströmgeschwindigkeit, die Daten des Propellerstrahls, die Fläche des Ruders im Propellerstrahl und die Anströmrichtung am Ruder bestimmen. Im Programm *ZWBF6G* wurde die von *Söding* in [22, 23] vorgeschlagene Methode zur Bestimmung des Ruderauftriebs benutzt. Aus den Berechnungsergebnissen ergab sich, daß dieser Anteil auch von untergeordneter Bedeutung ist.

3.5 Abschätzung des Zusatzwiderstandes eines Schiffes in kurzen Wellen

In kurzen Wellen ($\lambda/L \leq 0,5$) werden kaum Schiffsbewegungen erregt. Der nach der oben angegebenen Methode bestimmte Zusatzwiderstand ist daher sehr klein. Modellversuche zeigen aber, daß der Zusatzwiderstand pro Wellenhöhenquadrat in kurzen Wellen etwa halb so groß wie in Wellen von Schiffslänge ist.

Eine theoretische Erfassung dieser Erscheinung ist vielfach versucht worden. Z.B. hat *Lee* [24] die Widerstandserhöhung in kurzen Wellen berechnet; er benutzte dazu ein auf der zweidimensionalen Finite-Differenzen-Methode beruhendes Verfahren. Bisher gibt es aber noch keine praktische Methode zur Berechnung der Widerstandszunahme in kurzen Wellen.

Takahashi [25] gibt eine verhältnismäßig einfache halb-empirische Abschätzungsformel zur Bestimmung des Zusatzwiderstands in kurzen Wellen an:

$$\overline{R_{s1}(\omega, \mu)} = \frac{1}{2} \rho g \alpha_1 (1 + \alpha_2) \zeta_w^2 B \overline{\sin^2(\beta - \mu)} \quad (23)$$

mit

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 I_1^2(1, 5kd)}{\pi^2 I_1^2(1, 5kd) + K_1^2(1, 5kd)} \quad (24)$$

$$\alpha_2 = 3,5 \sqrt{F_n} (-\cos \mu) \quad (25)$$

$$\overline{\sin^2(\beta - \mu)} = \frac{1}{B} \left[\int_I \sin^2(\beta - \mu) dy + \int_{II} \sin^2(-\beta - \mu) dy \right] \quad (26)$$

Dabei sind I_1, K_1 die modifizierten *Bessel*-Funktionen; B und d sind Schiffsbreite und Tiefgang, $k = \omega/c$ die Wellenzahl. Die Formel ist anwendbar, wenn μ zwischen $\pi/2$ und $3\pi/2$ liegt; andernfalls ist der Zusatzwiderstand vernachlässigbar. (s. Bild 2)

Faltinsen hat in [15] eine ähnliche Methode zur Abschätzung des Zusatzwiderstandes in kürzeren Wellen veröffentlicht.

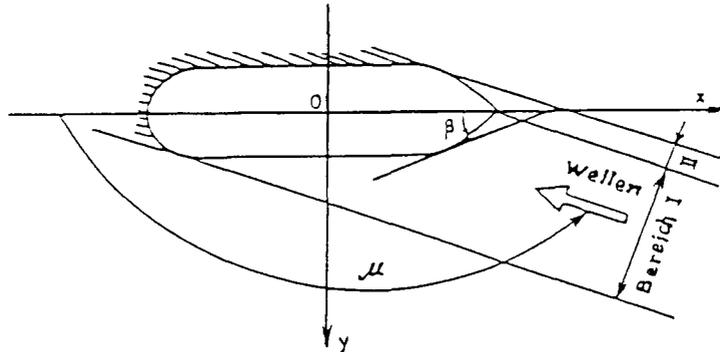


Bild 2. Koordinatensystem für die Berechnung des $\overline{R_{s1}(\omega, \mu)}$

3.6 Zusatzwiderstand im natürlichen Seegang

Für das Schiff in natürlichem Seegang kann die Varianz der Schiffsbewegungen, d.h. der Mittelwert des Quadrats der Bewegungen, aus dem Seegangsspektrum berechnet werden, wenn das Quadrat der Bewegungsamplitude in regelmäßigen Wellen dem Quadrat der Wellenamplitude proportional ist. Setzt man statt des Quadrats der Bewegungen den Zusatzwiderstand im Seegang, so gilt dieselbe Aussage ebenfalls, und es gilt die entsprechende Formel:

$$\overline{R_s} = 2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(\omega, \mu) Y_{R_s}^2 d\omega d\mu = 2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(\omega, \mu) \frac{\overline{R_s(\omega, \mu)}}{|\zeta_w(\omega)|^2} d\omega d\mu \quad (27)$$

mit $\overline{R_s(\omega, \mu)} = \overline{R_{s0}(\omega, \mu)} + \overline{R_{s1}(\omega, \mu)}$. Der statistische Mittelwert des Zusatzwiderstandes ist zweimal die Reaktionsspektrumsfläche.

Der Zusatzwiderstand in regelmäßigen Wellen wird normalerweise wie folgt dimensionslos gemacht:

$$R'_s(\omega, \mu) = \frac{\overline{R_s(\omega, \mu)}}{\rho g |\zeta_w(\omega)|^2 B^2/L} \quad (28)$$

Das Windseespektrum kann als Produkt aus einem Richtungsfaktor $f \cdot \cos^n(\mu - \mu_0)$ und dem eindimensionalen Windseespektrum angenähert werden. Unregelmäßiger Seegang wird gekennzeichnet durch die Parameter kennzeichnende Höhe $H_{1/3}$, kennzeichnende Periode T_1 , Hauptlaufrichtung μ_0 , Exponent für die Winkelverteilung n und manchmal auch durch die Spitzenüberhöhung γ und die Spitzenbreite b . Abhängig von diesen Parametern setzt man ein Seegangsspektrum an. Es beschreibt die Verteilung der Wellenenergie auf die verschiedenen Wellenkreisfrequenzen ω und Laufrichtungen μ . Unter verschiedenen Standarddarstellungen für Seegangsspektren wurde hier das etwas umgeformte JONSWAP-Spektrum [21 und 26] gewählt:

$$S(\omega, \mu) = H_{1/3}^2 T_1 \frac{177,5 - 6,25\gamma}{(T_1 \omega)^5} e^{-1,25 \frac{\omega^4}{\omega_m^4}} \gamma^{\exp(-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2b^2 \omega_m^2})} f \cdot \cos^n(\mu - \mu_0) \quad (29)$$

für $|\mu - \mu_0| \leq \frac{\pi}{2}$; sonst $S = 0$.

Die Kreisfrequenz ω_m des Maximums von $S(\omega, \mu)$ ergibt sich zu

$$\omega_m = \frac{4,65 + 0,182\gamma}{T_1} \quad (30)$$

Der Faktor f dient zur Normierung der Winkelverteilung:

$$\int_{\mu_0 - \frac{\pi}{2}}^{\mu_0 + \frac{\pi}{2}} f \cdot \cos^n(\mu - \mu_0) d\mu = 1 \quad (31)$$

μ_0 ist die Windrichtung und gleichzeitig die Hauptrichtung, in der die meiste Wellenenergie läuft; im Bereich $\pm 90^\circ$ um die Windrichtung μ_0 fällt die Wellenenergie von ihrem Maximalwert auf 0 ab.

Für $\gamma = 3,3$ erhält man das "mittlere" JONSWAP-Spektrum. Mit einer Spitzenüberhöhung $\gamma = 1$ und $n = 2$ ergibt sich das Pierson-Moskowitz-Spektrum. Das JONSWAP-Spektrum wird für die Berechnung von Maximalbelastungen empfohlen, weil starker Seegang erfahrungsgemäß dieser Spektralform sehr nahekommt. Für die Bestimmung von Lastverteilungen für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen spielen jedoch auch die häufigeren, schwächeren Seegänge eine Rolle. Dabei kommt oft Überlagerung von Windsee mit höheren und Dünung mit geringeren Kreisfrequenzen vor. Dies führt zu breiteren oder 2-gipfeligen Spektren (z. B. Pierson-Moskowitz-Spektrum) [21 und 26].

Im Programm ZWBF6G sind zwei Spektrformen vorgesehen:

- Pierson-Moskowitz-Spektrum

Hierbei werden die kennzeichnende Höhe $H_{1/3}$ und die kennzeichnende Periode T_1 mit Hilfe der Daten nach Hattendorff [27] aus der Beaufort-Windstärke bestimmt.

- JONSWAP-Spektrum

Hierfür müssen die Parameter $H_{1/3}$, T_1 , n , γ und μ_0 als Eingabedaten angegeben werden. Die Berechnungen können für mehrere Spektren hintereinander durchgeführt werden.

3.7 Erhöhung des Schiffswiderstandes durch Wind

In [28] ist die Mehrleistung für periodisch schwankende Windkräfte und -momente abhängig von den Konstanten des Kursreglers untersucht worden. Im Programm ZWBF6G wird dagegen der stationäre Wind berücksichtigt. Bei der Betrachtung des Windwiderstandes muß man zwischen den aerodynamischen (X_w) und hydrodynamischen (X_h) Anteilen unterscheiden (s. Bild 3). Die Komponente der Luftkraft in Schiffs längsrichtung $-X_w = -\frac{\rho_a}{2} V_a^2 A_L C_x$ ist nur ein Teil dieser Widerstandserhöhung. Dabei ist ρ_a die Luftdichte, V_a die scheinbare Windgeschwindigkeit (d.h. die Relativgeschwindigkeit zwischen

Luft und Schiff), A_L die Lateralfäche und C_x der Beiwert des Längswiderstandes. Die Kenntnis der Kräfte an schräg umströmten länglichen Objekten beruht auf Meßwerten.

Dieser Anteil kann nach einem Verfahren bestimmt werden, das *Blendermann* [29] durch Auswertung vieler Windkanalmessungen aufgestellt hat. Dabei bestimmt man zunächst die Koeffizienten CD_l und CD_q , d.h. die Beiwerte des Widerstandes in Längs- und Quer- richtung, sowie den Querkraftkoeffizient δ für den jeweiligen Schiffstyp. Daraus ergibt sich dann für beliebige Windeinfallrichtungen ϕ der Längswiderstandsbeiwert

$$C_x = -CD_l \frac{\cos \phi}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right) \sin^2 2\phi} \quad (32)$$

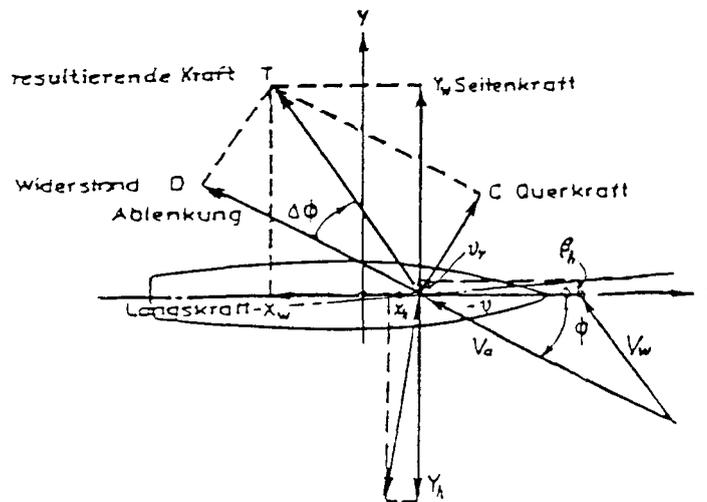


Bild 3. Windkräfte und Driftwinkel

Die gleichzeitig auftretende Seitenkraft Y_w muß durch eine gleichgroße Kraft Y_h des Unterwasserschiffes ausgeglichen werden. Diese entsteht durch die Driftgeschwindigkeit des Rumpfes in Querrichtung [30].

Die hydrodynamische Kraft Y_h entsteht sowohl durch die Zirkulation der Strömung um den schräg angeströmten Rumpf als auch durch den Widerstand gegen Querumströmung des Schiffes. Der zweite Anteil ist jedoch meist ziemlich klein; er gewinnt erst bei größerem Driftwinkeln β_h an Bedeutung.

Die induzierte Querkraft Y_i läßt sich aus der hydrodynamischen Masse für Horizontalbeschleunigung des Endquerschnitts des Schiffes, m_y^{**} , und der Quergeschwindigkeit v_y (oder des Driftwinkel $\beta_h = -\arctan \frac{v_y}{v_x}$) abschätzen:

$$Y_i = m_y^{**} v_x v_y \quad (33)$$

Im Programm *ZWBF6G* wurde β_h statt dessen durch eine Regressionsformel abgeschätzt, die aus den Versuchen von *Wagner* [31] abgeleitet wurde:

$$\beta_h = 0,5 \cdot 10^{-7} \left(\frac{A_L}{L \cdot D}\right)^{1,28} \left(\frac{V_w}{v}\right)^{1,71} [1 + 0,5 \cdot \left(\frac{V_w}{v} - 1,5\right)] \sin\left(\phi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot \sin(2\phi) \quad (34)$$

Dabei ist V_w die Geschwindigkeit des "wahren" Windes, v die Fahrtgeschwindigkeit.

Die Auftriebserzeugung ist mit einem induzierten Widerstand verbunden. Die x-Komponente der aus Auftrieb und Widerstand zusammengesetzten hydrodynamischen Kraft X_i kann sowohl positiv als auch negativ sein. Hier wird eine Zahl ϵ_y wie folgt definiert (vgl. mit $\epsilon = C_D/C_C$ in [30]):

$$\epsilon_y = C_x/C_y = f(\beta_h) \quad (35)$$

Wagner gibt in [31, 32] auf Grund der Auswertung von Schrägschleppversuchen z. B. für das Mariner-Schiff an:

$$\epsilon_y = 1,58 \beta_h - 6,85 \beta_h^2 \quad (36)$$

Mit dem so abgeschätzten Driftwinkel β_h ergibt sich eine zusätzliche Längskraft [30]:

$$X_i = \epsilon_y Y_i \quad (37)$$

Der gesamte, am Über- und Unterwasserschiff auftretende Widerstand durch den Wind ergibt sich damit zu

$$R_w(\mu_0) = -X_w - X_i = -\frac{\rho_a}{2} V_a^2 A_L C_x - \epsilon_y Y_i \quad (38)$$

Der scheinbare Wind ergibt sich durch vektorielle Addition des wahren Windes (Betrag V_w , Richtung μ_0) und der Fahrt des Schiffes (Betrag v , Richtung β_h). Zur näherungsweisen Berücksichtigung der Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe (Windprofil) wird das Quadrat der Windgeschwindigkeit über die Überwasser-Lateralfläche gemittelt, da die Windkräfte dem Quadrat der Windgeschwindigkeit proportional sind [30].

3.8 Mehrleistungsbedarf von Schiffen im Seegang

Der zeitlich gemittelte Widerstand eines Schiffes kann wie folgt dargestellt werden [33]:

$$\overline{R_{aw}(\mu_0)} = R_g + \overline{R_s(\mu_0)} + R_w(\mu_0) \quad (39)$$

Darin bezeichnet R_g den Schiffswiderstand im glatten Wasser. Aus dem Widerstand $\overline{R_{aw}(\mu_0)}$ ergibt sich die Schleppleistung $\overline{P_{aw}(\mu_0)}$ zu

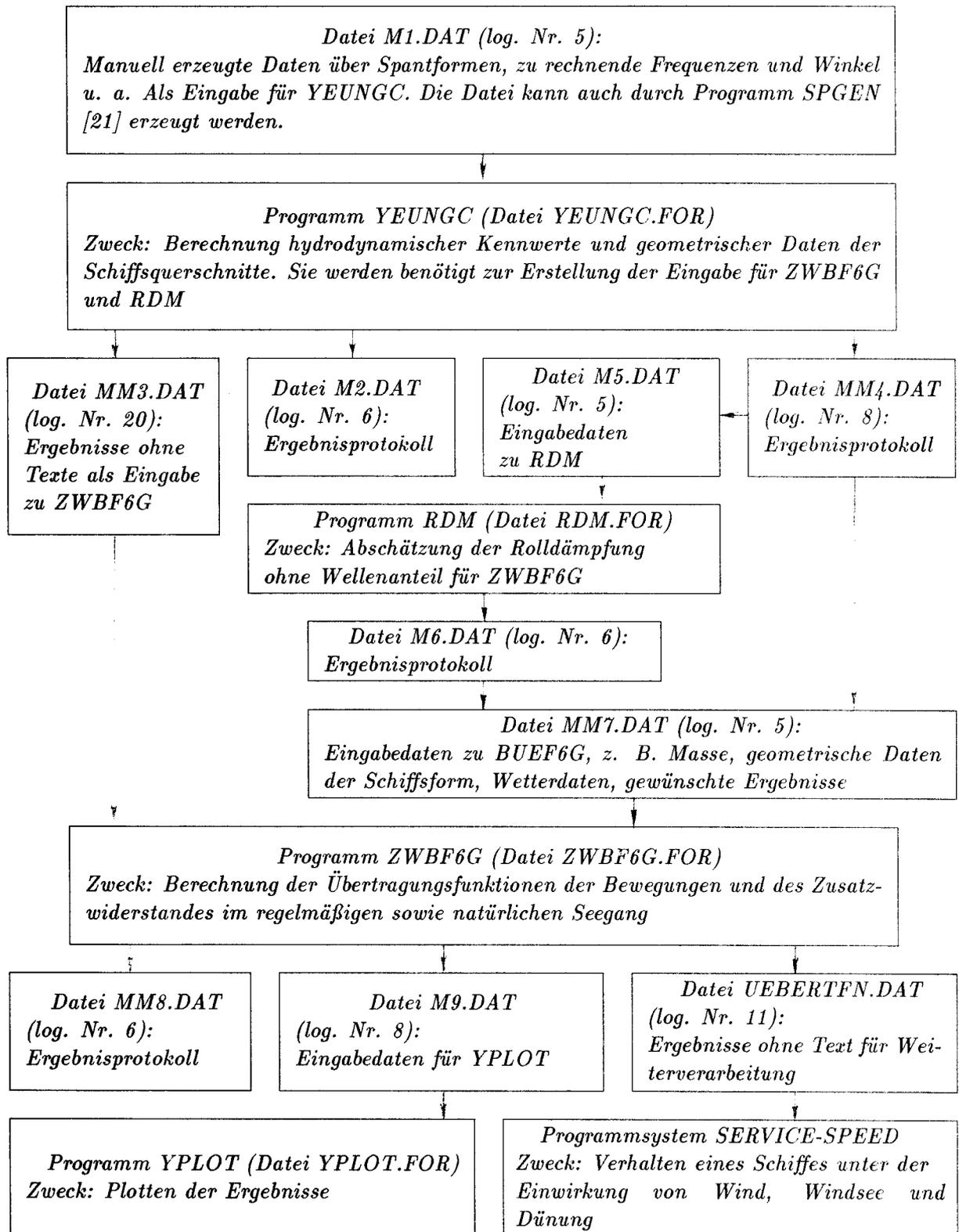
$$\overline{P_{aw}(\mu_0)} = \overline{R_{aw}(\mu_0)} \cdot v \quad (40)$$

Die erforderliche Antriebsleistung ergibt sich daraus zu

$$\overline{P_{aaw}(\mu_0)} = \frac{\overline{P_{aw}(\mu_0)}}{\eta_0 \cdot \eta_H \cdot \eta_R} \quad (41)$$

Dabei ist η_R der Gütegrad der Anordnung, $\eta_H = (1 - t)/(1 - w)$ der Schiffseinflußgrad und η_0 der Propellerwirkungsgrad. Diese drei Werte werden von der Routine *SERVV* unter der Annahme berechnet, daß sie im Seegang nicht anders als in glattem Wasser sind.

Tab. 1: Übersicht über das Programmsystem SIS und die dabei benutzten Dateien



4 Das Programmsystem *SIS*

Die Berechnungen werden mit einer Folge von Fortran 77-Programmen durchgeführt (s. Tab. 1). Die ausführliche Beschreibung des Programmsystems ist als IfS-Schrift veröffentlicht [34]. Das System besteht aus folgenden Teilen:

- *YEUNGC* (Berechnung von geometrischen und hydrodynamischen Spantkennwerten)
- *ZWBF6G* (Berechnung der Übertragungsfunktionen der Bewegungen und des Zusatzwiderstandes in regelmäßigen Wellen und in stationärem Seegang)
- *RDM* (Berechnung des nicht durch Effekte der Potentialströmung bedingten Rolldämpfungsmoments)
- *YPLOT* (Plotten der Übertragungsfunktionen der Bewegungen)
- *SERVICE-SPEED* (Berechnung der Antriebsleistung eines Schiffes und der erreichbaren Geschwindigkeit abhängig von den Wetterbedingungen)

5 Berechnungsergebnisse und Vergleich mit Versuchen

Hier möchten wir die eigenen Berechnungsergebnisse mit Versuchsergebnissen für ein schnelles Containerschiff *S-175* vergleichen. Die Hauptdaten des Schiffes zeigt Tabelle 2. Der Spantenriß ist in [16] (Bild 2) angegeben. Dort sind weiter in den Bildern 3 bis 12 die Übertragungsfunktionen der Bewegungen in 6 Freiheitsgraden angegeben.

Zum Vergleich des Zusatzwiderstandes werden die Berichte von *Takahashi* [25] und von *Nakamura* [33] benutzt.

Tab. 2 Hauptdaten des Containerschiffes *S-175*:

		Schiff	Modell
Schiffslänge	L [m]	175.000	4.500
Breite	B [m]	25.400	0.653
Seitenhöhe	D [m]	15.400	0.396
Tiefgang am vord. Lot	d_f [m]	8.000	0.2057
Tiefgang am hint. Lot	d_a [m]	9.000	0.2314
Hecklastiger Trimm	t [m]	1.000	0.0257
Blockkoeffizient	C_B	0.562	0.562
Verdrängungsvolumen	V [m ³]	21222.0	0.3608
x -Koord. des Schwerpunktes	L_{CB} [m]	3.164	0.0813
Höhe des Massenschwerpunktes	KG [m]	9.39	0.2414
Metazentrische Höhe	GM [m]	1.00	0.0257
Rollperiode	T [s]	18.	2.886
Ruderfläche	A_r [m ²]	26.69	0.01763
Propeller-Durchmesser	DD [m]	6.500	0.1672
Steigungsverhältnis	PD	1.009	1.009
Flächenverhältnis	$AE0$	0.6935	0.9635
Anzahl der Flügel	Z	5	5
Breite des Schlingerkiels	B_{BK} [m]	0.45	0.0116
Länge des Schlingerkiels	L_{BK} [m]	43.75	1.125

In den Bildern 4 und 5 sind die nach dem hier beschriebenen Verfahren *ZWBF6G* berechneten dimensionslosen Zusatzwiderstände jeweils für verschiedene *Froudsche* Zahlen ($F_n = 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35$) den gemessenen Werten (nach [25]) gegenübergestellt. Generell ist der berechnete Zusatzwiderstand im Bereich des Maximums bei $\mu > 90^\circ$ ein bißchen größer als der gemessene; bei $\mu \leq 90^\circ$ verhält es sich umgekehrt. Im Bereich kurzer Wellen werden die berechneten Werte durch die Abschätzungsmethode gegenüber den Berechnungen in [9 und 14] verbessert. Und was besonders bemerkenswert ist: Der berechnete Zusatzwiderstand kann im Bereich $\lambda/L \simeq 1$ und auch bei $\omega_e \simeq 0$ im schrägfolgenden Seegang schwach negativ werden. Zwischenergebnisse zeigen, daß die Anteile infolge Querbewegung und infolge der Längskomponente der Orbitalbewegung von untergeordneter Bedeutung sind.

Wie Bild 4 für Wellen aus vorlichen und Bild 5 für Wellen aus achterlichen Richtungen zeigen, stimmen die nach dem hier beschriebenen Verfahren berechneten Zusatzwiderstände in regelmäßigen Wellen verschiedener Frequenz im allgemeinen gut mit den Meßwerten nach *Takahashi* überein.

Mit der dimensionslosen Widerstandserhöhung in regelmäßigen Wellen, die nach dem zuvor beschriebenen Programm *ZWBF6G* berechnet wurde, wird nun die mittlere Widerstandserhöhung des Containerschiffs *S-175* für Fahrt bei fünf verschiedenen Seegangszuständen ermittelt. In den Bildern 6 und 7 sind die ebenfalls mit *ZWBF6G* berechneten Schleppleistungen $\overline{P_{aw}(\mu_0)}$ des Containerschiffs *S-175* in glattem Wasser und in Seegang, der den *Beaufort*-Graden $B_n = 6$ bis 10 entspricht, dargestellt. Die Ergebnisse enthalten auch den Einfluß des Windes, aber nicht den Einfluß des Ruders und den indirekten Einfluß durch die Driftbewegung des Schiffes, die auch Längskräfte bewirkt.

In den Bildern 8 und 9 ist die von *SERVV1* berechnete Wellenleistung $\overline{P_{aw}(\mu_0)}$ des Containerschiffs *S-175* im glatten Wasser und im Seegang dargestellt. Dabei sind jetzt auch die Kräfte und Momente auf Ruder und Rumpf und das Kurshaltevermögen bei stationärer Driftbewegung des Schiffes infolge der Einwirkung des Windes berücksichtigt.

Zum Vergleich sind in Bild 10 Zusatzwiderstände in regelmäßigen Wellen R'_s aus verschiedenen Richtungen nach Modellmessungen und nach Berechnungen von *Takahashi* [25] für das Containerschiff *S-175* angegeben. Die Bilder 11 und 12 zeigen andererseits Rechenergebnisse von *Nakamura* [33] für regelmäßige Wellen bzw. für natürlichen, durch *Beaufort*-Grade gekennzeichneten Seegang für dasselbe Schiff. Die angegebenen Wellenleistungen berücksichtigen den Windeinfluß, aber nicht den Ruder- und Drifteinfluß.

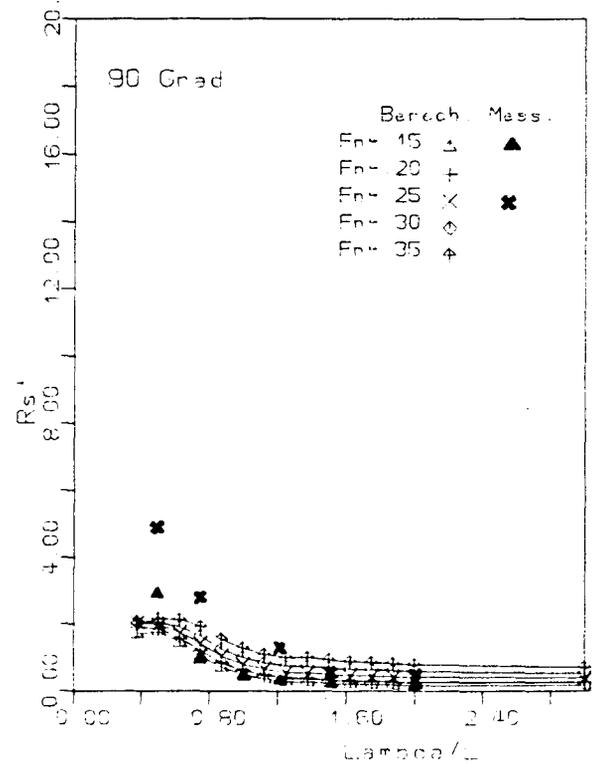
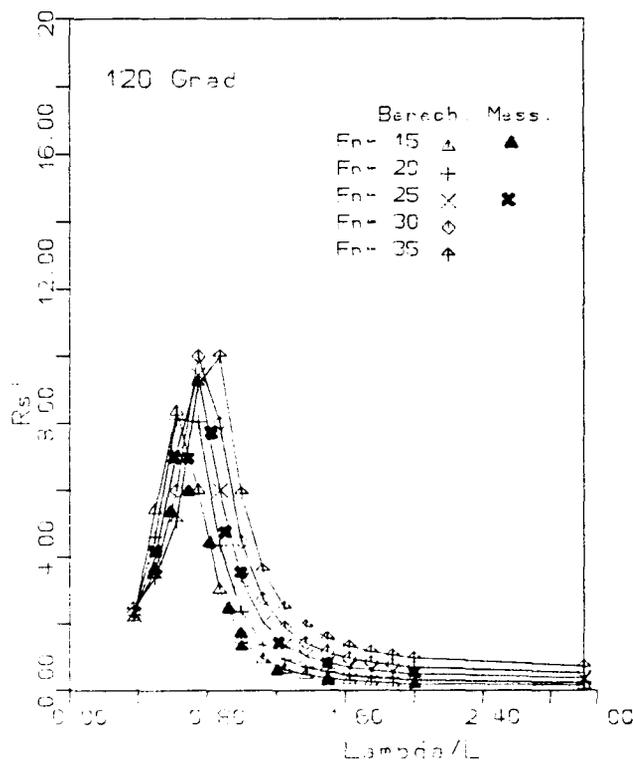
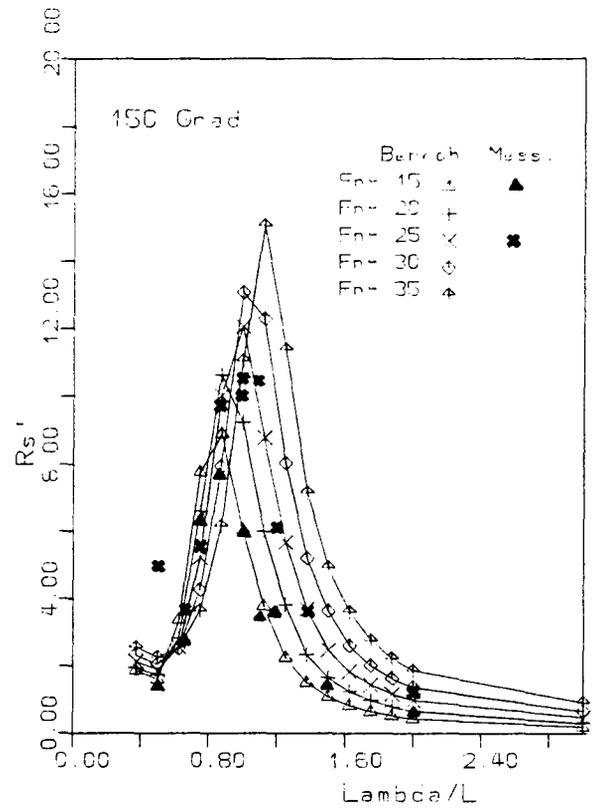
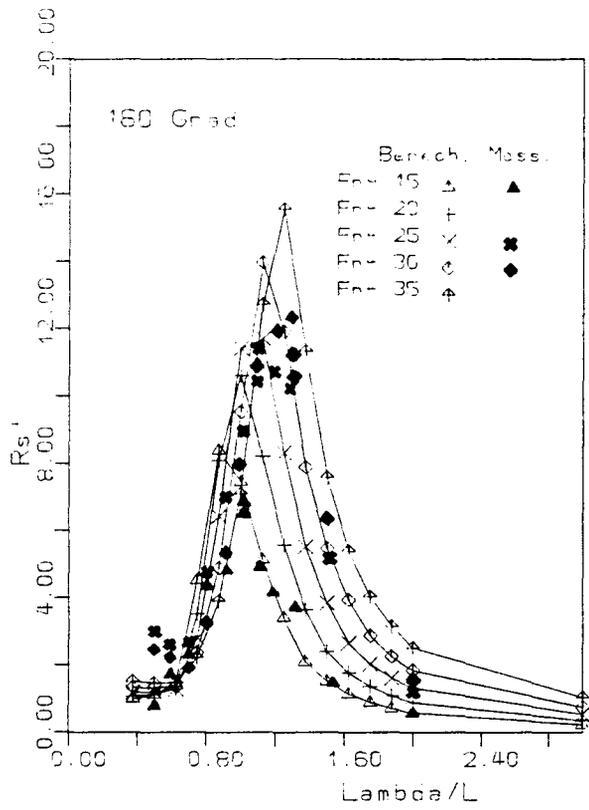


Bild 4. Dimensionsloser Zusatzwiderstand $R'_s(\omega, \mu)$ des Containerschiffs S-175 bei $F_n = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35$

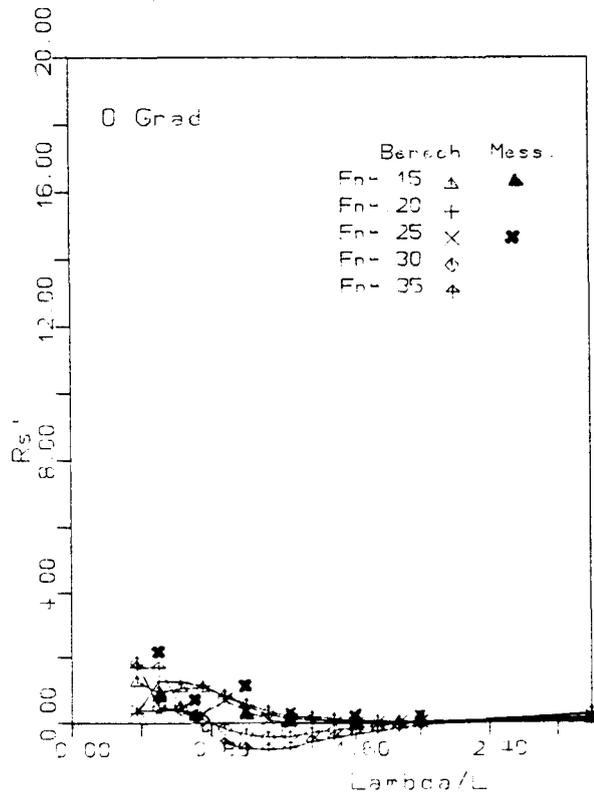
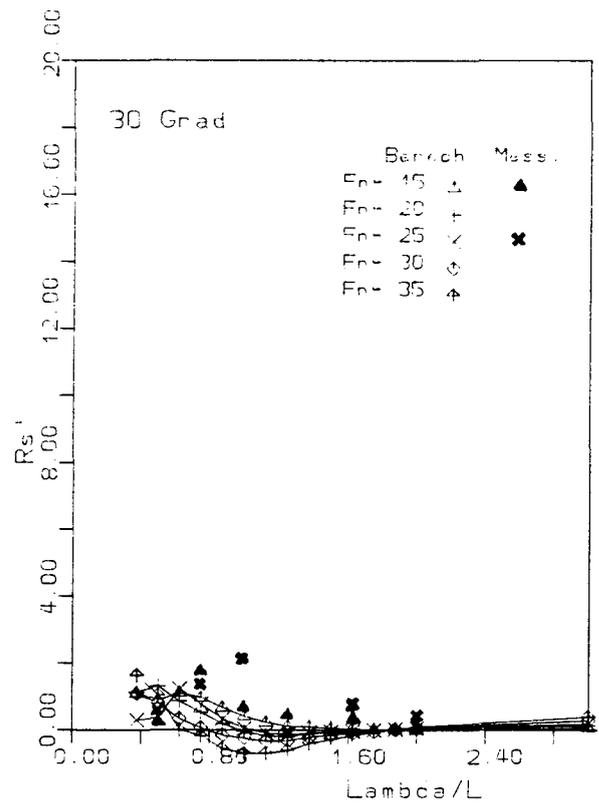
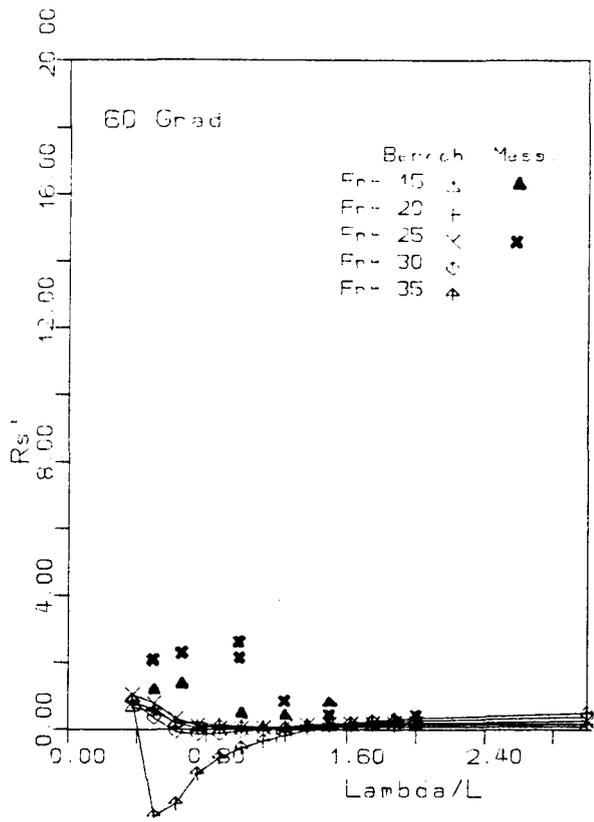


Bild 5. Dimensionsloser Zusatzwiderstand $R'_s(\omega, \mu)$ des Containerschiffs S-175 bei $F_n = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35$

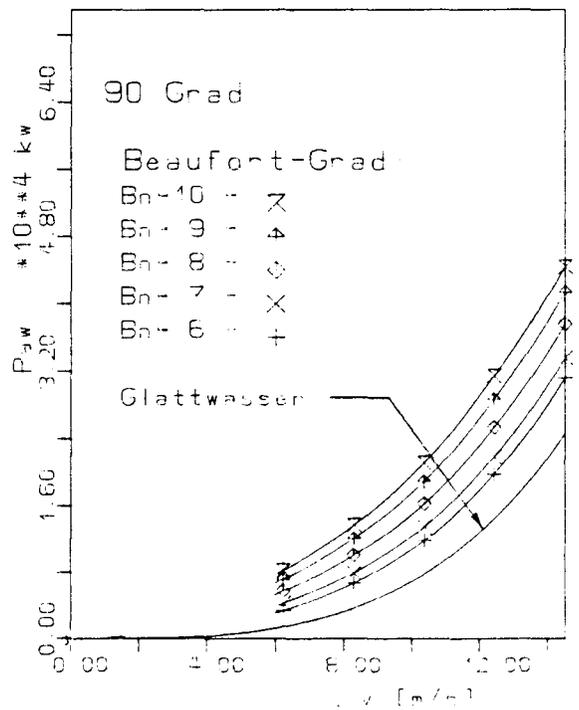
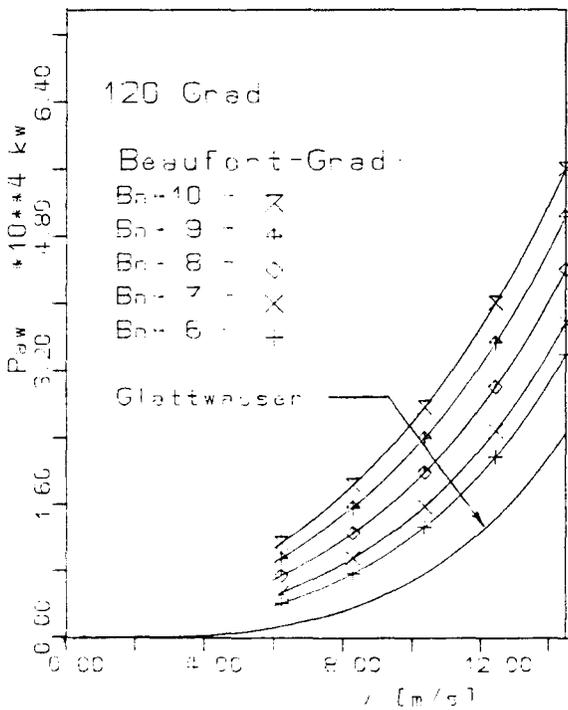
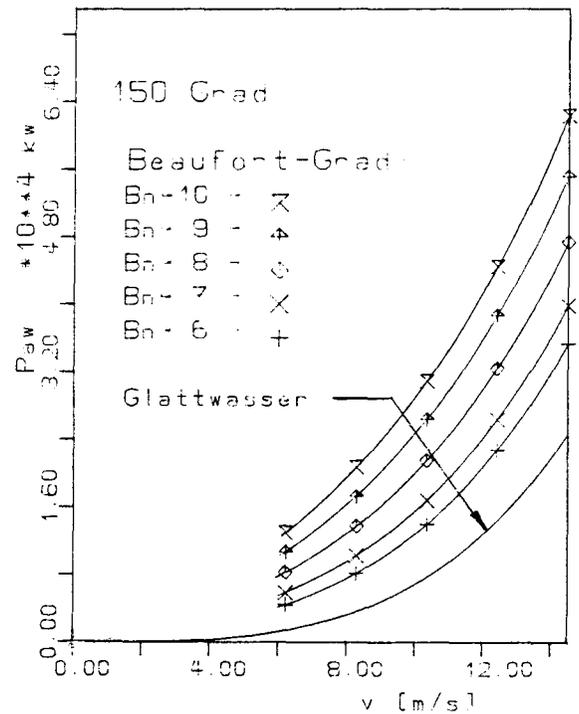
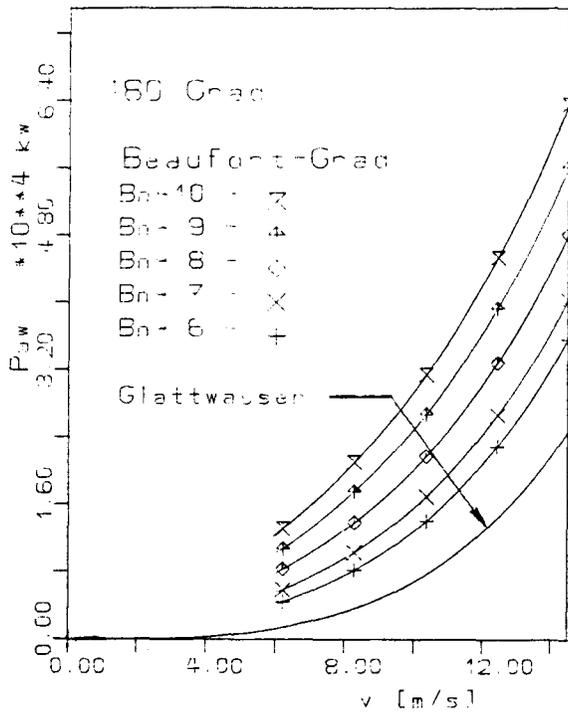


Bild 6. Schleppleistung $\overline{P_{aw}(\mu_0)}$ des Containerschiffs S-175 im Glattwasser und im Seegang entspr. Beaufort 6 bis 10 bei $F_n = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35$

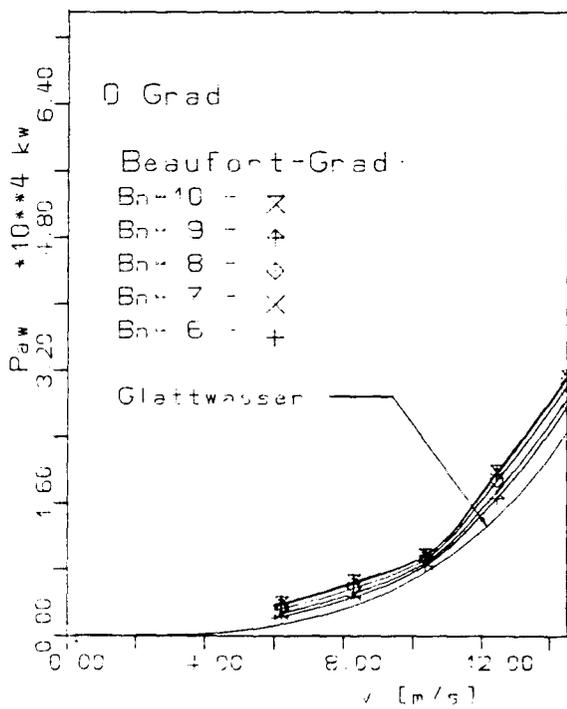
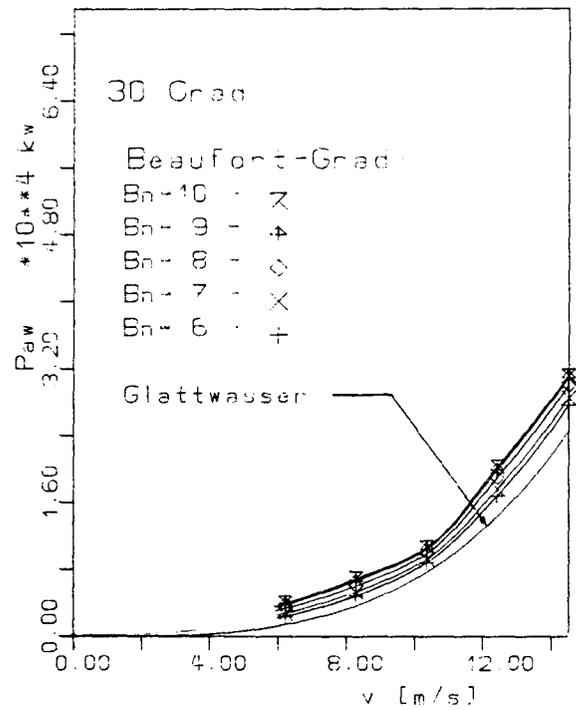
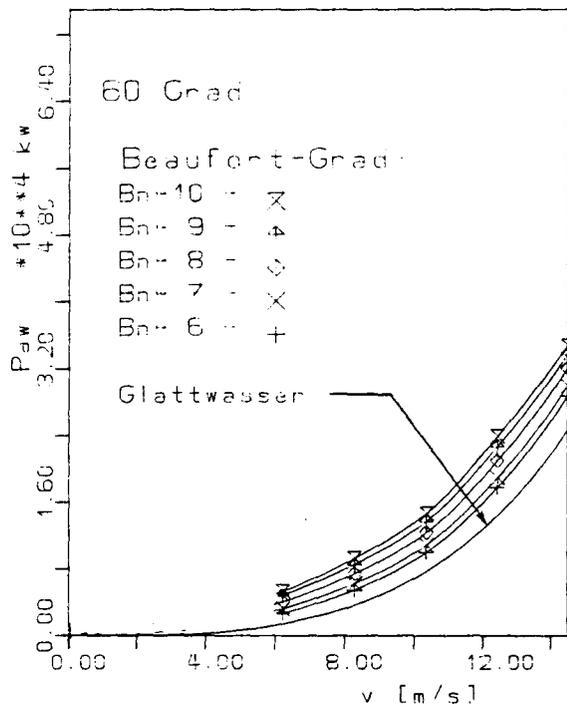


Bild 7. Schleppleistung $\overline{P_{aw}(\mu_0)}$ des Containerschiffs S-175 im Glattwasser und im Seegang entspr. Beaufort 6 bis 10 bei $F_n = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35$

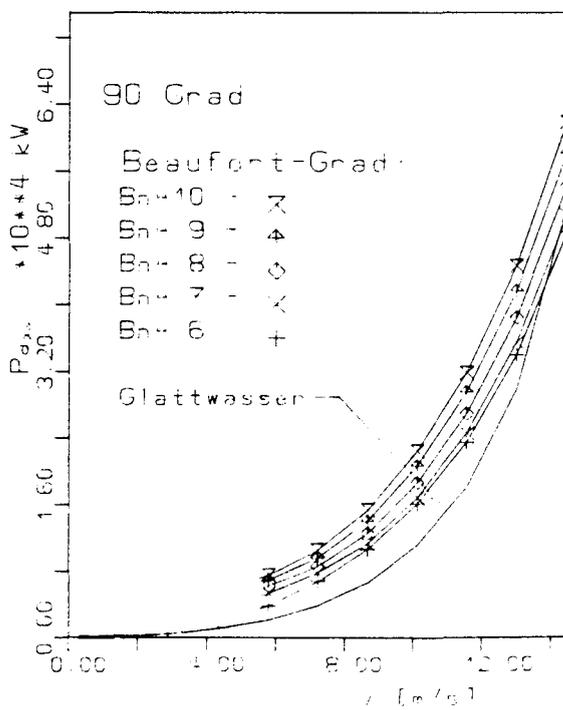
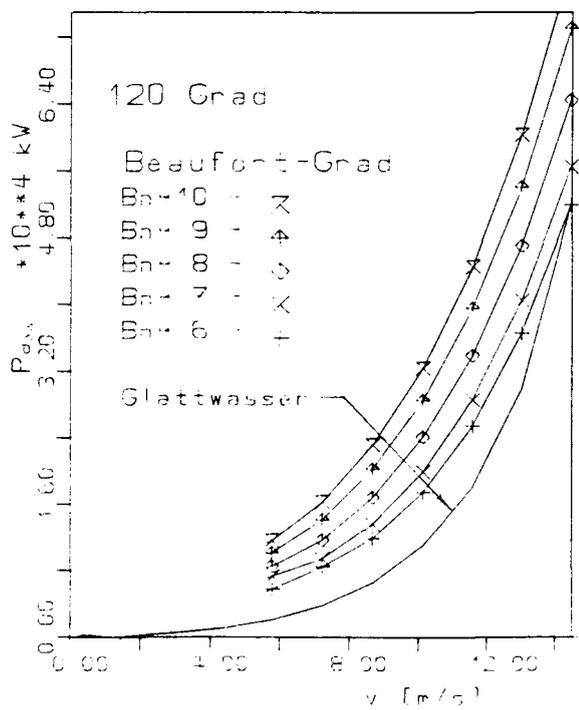
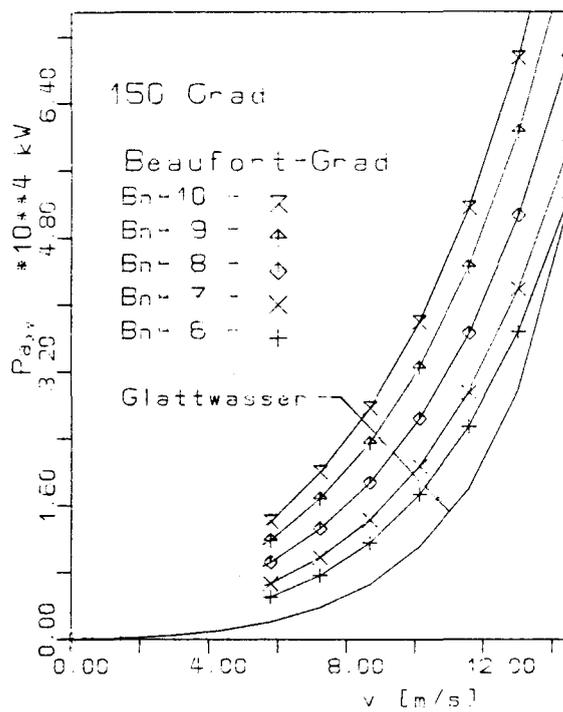
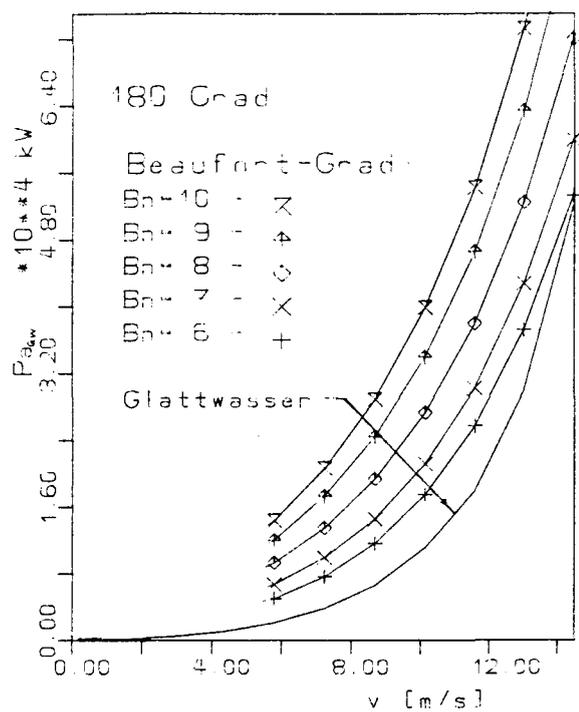


Bild 8. Antriebsleistung $\overline{P_{aaw}(\mu_0)}$ des Containerschiffs S-175 im Glattwasser und im Seegang entspr. Beaufort 6 bis 10 bei verschiedener Fahrtgeschwindigkeiten

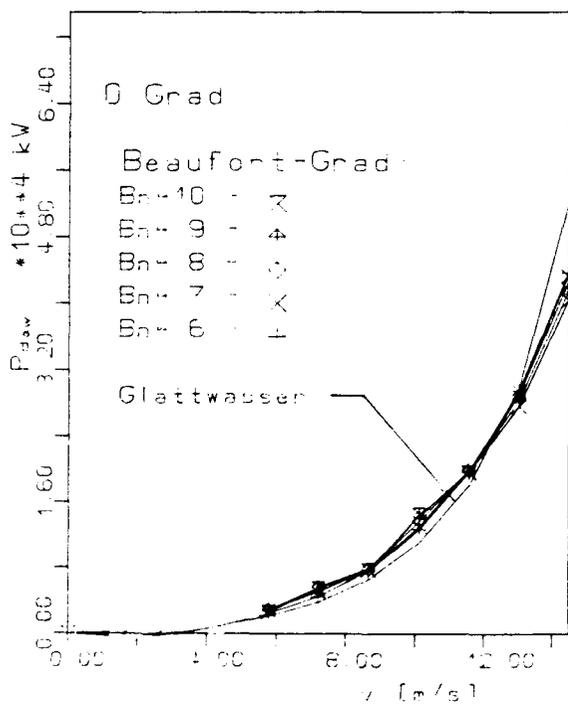
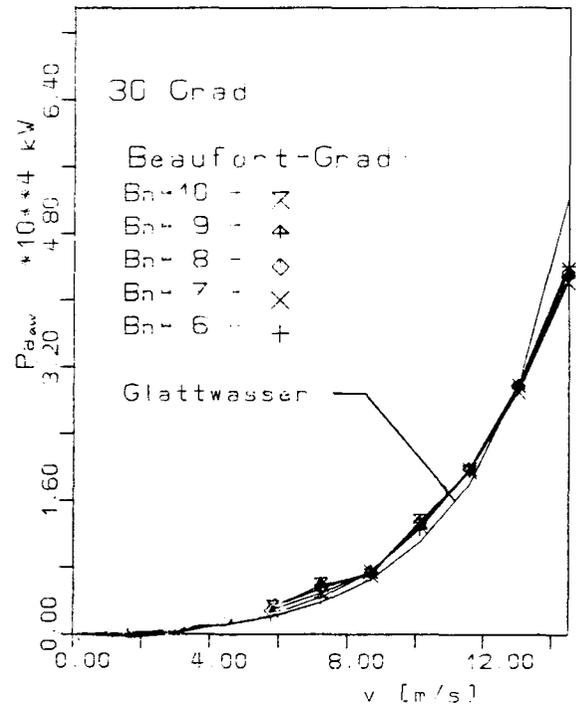
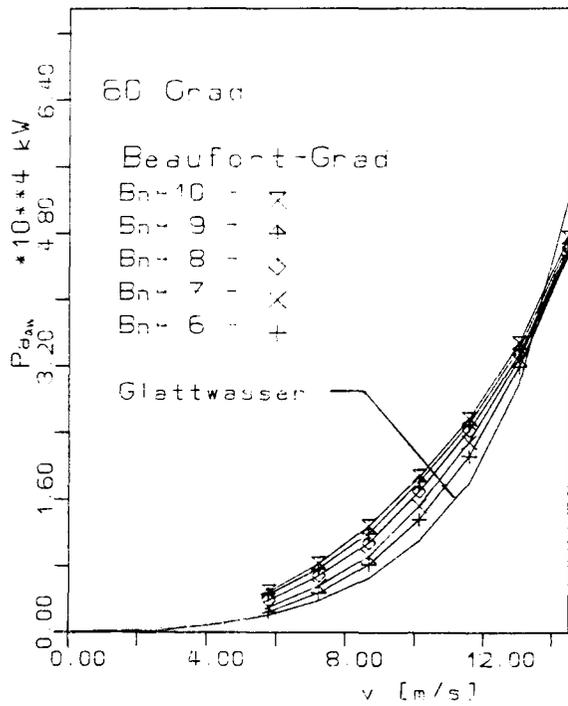
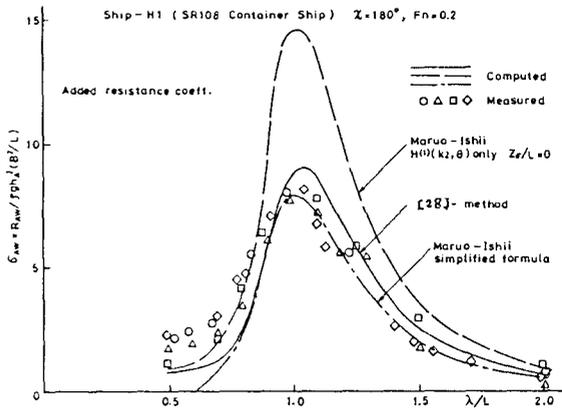
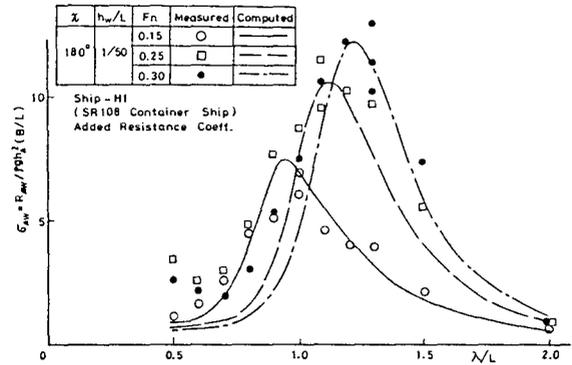


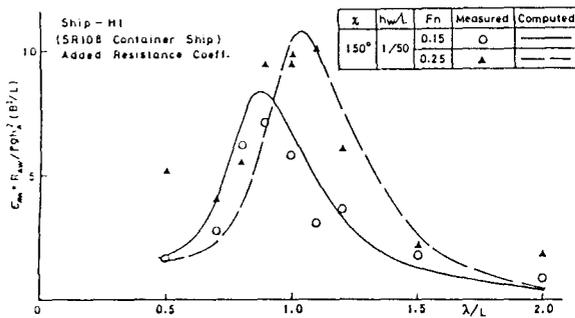
Bild 9. Antriebsleistung $\overline{Pa_{aw}(\mu_0)}$ des Containerschiffs S-175 im Glattwasser und im Seegang entspr. Beaufort 6 bis 10 bei verschiedener Fahrtgeschwindigkeiten



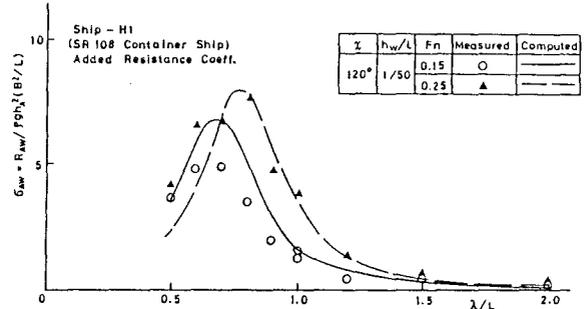
Comparison between measured and computed added resistance



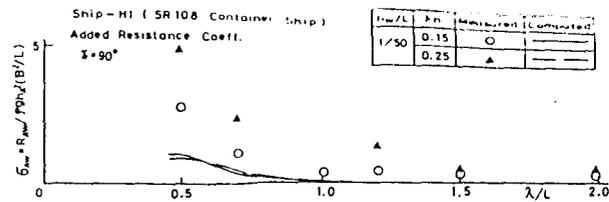
Comparison between measured and computed added resistance



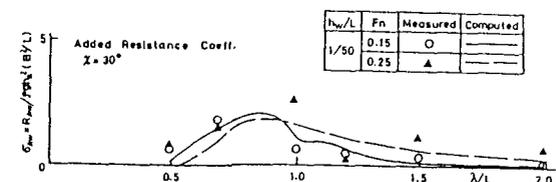
Comparison between measured and computed added resistance



Comparison between measured and computed added resistance



Comparison between measured and computed added resistance



Comparison between measured and computed added resistance

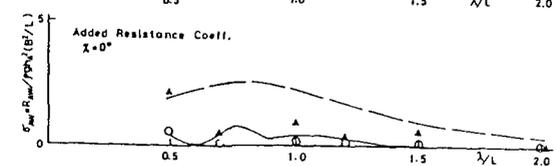
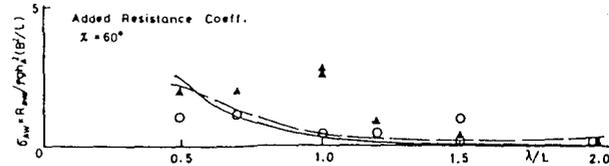
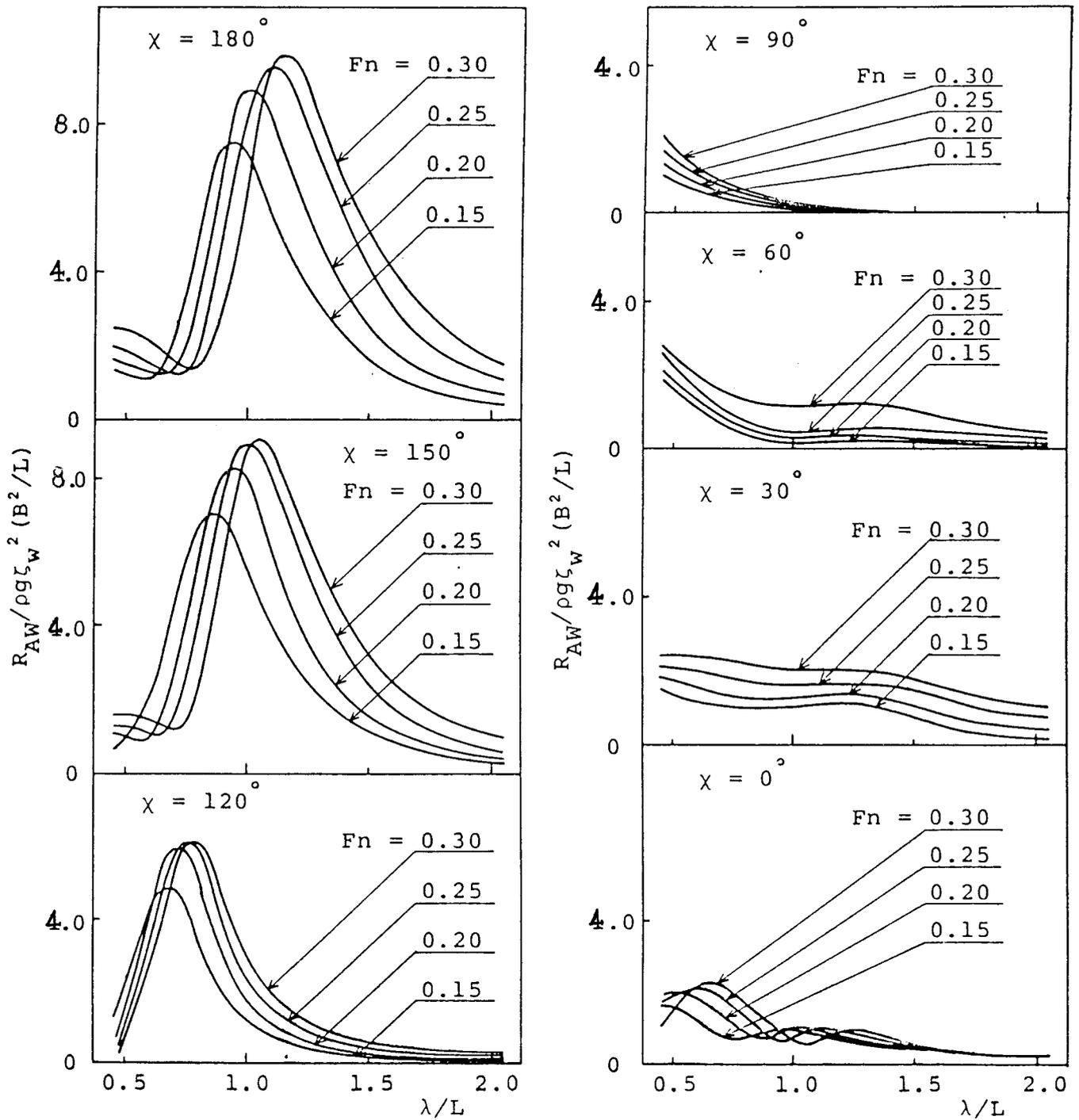


Bild 10. Berechneter und gemessener dimensionsloser Zusatzwiderstand $R'_s(\omega, \mu_0)$ des Containerschiffs S-175 nach [25]



Resistance increase in regular oblique waves.

Bild 11. Berechneter dimensionsloser Zusatzwiderstand $R'_s(\omega, \mu_0)$ des Containerschiffs S-175 nach [33]

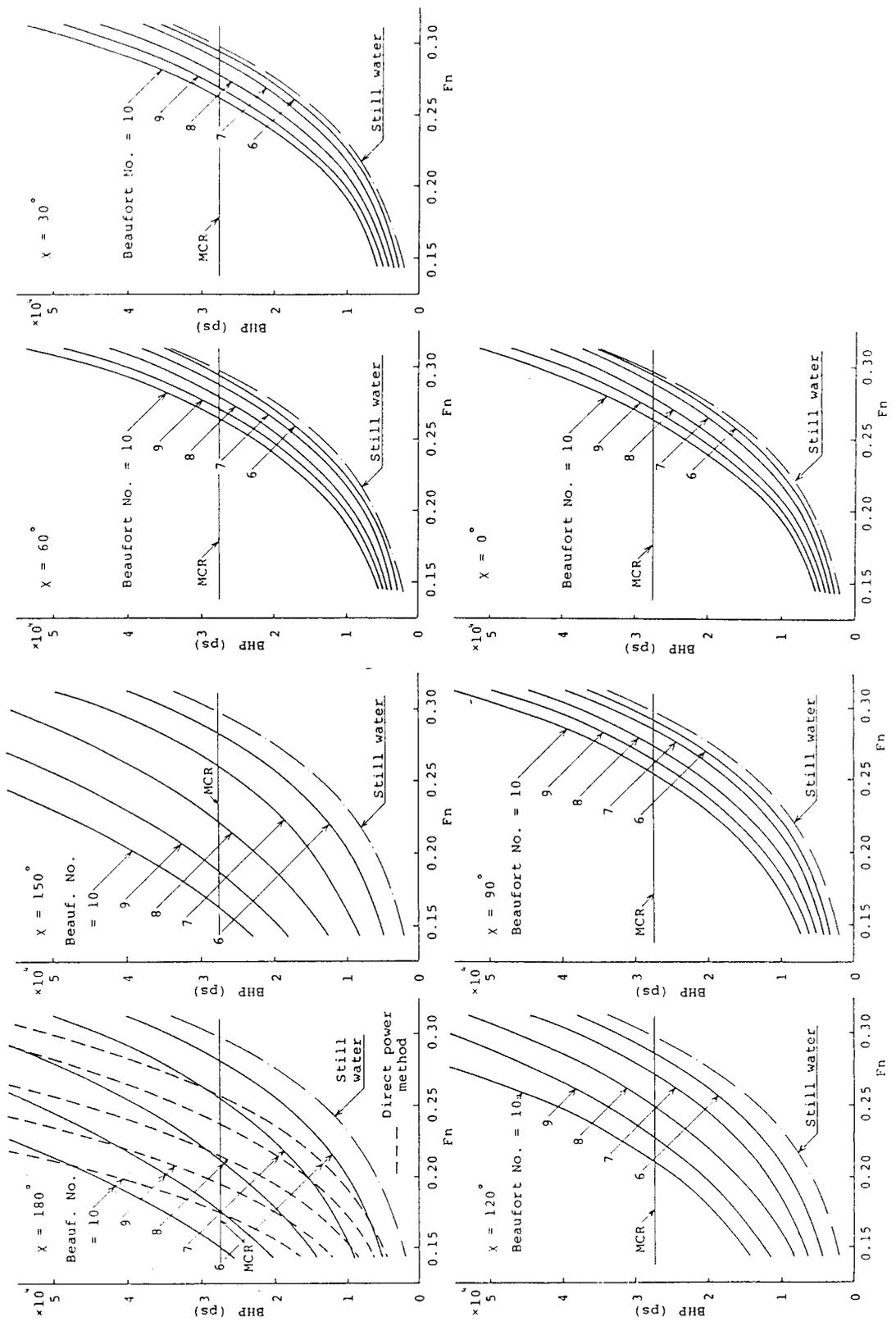


Bild 12. Wellenleistung $\overline{Pa_{aw}(\mu_0)}$ des Containerschiffs S-175 im Glattwasser und im Seegang entspr. Beaufort 6 bis 10 nach [33]

6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen am Beispiel eines Containerschiffs, daß eine recht genaue Bestimmung des Zusatzwiderstandes und des Mehrleistungsbedarfs eines Schiffes in regelmäßigen Wellen und im unregelmäßigen Seegang mit dem Programmsystem *ZWBF6G* durchgeführt werden kann. Es zeigte sich, daß bei mittleren Seegangszuständen und mäßigen Geschwindigkeiten die Widerstandserhöhung bereits in der Größenordnung des Glattwasserwiderstandes liegt. Unter Zugrundlegung eines Seegebietes mit bekannter Langzeit-Verteilung von Seegangs- und Winddaten sowie Kursverteilungen für das Schiff lassen sich dann Mittelwerte für die erreichbare Geschwindigkeit und den Leistungsbedarf über lange Zeiträume angeben [33].

Für seine Geduld und seine wertvollen Hinweise gebührt Prof. Dr.- Ing. *Söding* ebenso wie verschiedenen meiner Kollegen, die mir bei diesen Arbeiten geholfen haben, mein herzlicher Dank.

Einige der in diesem Beitrag enthaltenen Ergebnisse sind im Rahmen eines Forschungsvorhabens erzielt worden, das vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert wurde.

7 Literaturverzeichnis

1. *Ogilvie, T. F.; Becker R. F.:* "Transfer Functions for Predicting Ship Motion: A Review of the Theory", **Tech. & Research Symposium S. 3: Seakeeping 1953-1973**
2. *Dalzell, J. F.:* "Application of Cross-Bi-Spectral Analysis to Ship Resistance in Waves", **Daudson, Laboratory Report No: SIT-DT-72-1606, May 1972**
3. *Jinkine, Ferdinande:* "A Method for Predicting the Added Resistance of Fast Cargo Ships in Head Waves", **ISP., Rotterdam 21 (1974) 238**
4. *Moor, D. I., Murdey, D. C.:* "Motions and Propulsion of Single Screw Model in Head Seas" **Trans. RINA, part I: vol. 110(1968) S.403; part II: vol.112(1970) S.121**
5. *Schifrin:* "Näherungsformeln für die Berechnung des zusätzlichen Schiffswiderstandes bei regelmäßigen Wellen" (russ.). **Sudostroenie, Leningrad 63 (1973)12**
6. *Shintani, A.:* "A Simple Estimation Method for Resistance Increase of Ships in Head Seas", **Journal of the Naval Architects of Japan, vol. 161, June 1987**
7. *Kreitner, J.:* "Heave, Pitch and Resistance of Ship in a Seaway", **TINA 1939, S. 203**
8. *Havelock, T. H.:* "The Drifting Force on a Ship among Waves", **Philosophical Magazin, 7, 1942, 467-475**
9. *Maruo, H.:* "Calculation of Added Resistance in Head Sea Waves by Means of a Simplified Formula", **JSNA. Japan, vol. 140, Dec. 1976**
10. *Maruo, H.:* "Calculation of Added Resistance in Oblique Waves", **JSNA. Japan, vol. 147, June 1980**
11. *Gerritsma, J.; Beukelman, W.:* "Analysis of the Resistance in Wave of a Fast Cargo Ship", **ISP. vol. 19, No. 217, Sept. 1972**
12. *Kholodilin, A. N.; Yurkov N. N.:* "On Added Resistance of Ships in Head Waves", **Proc. of the 14th Internat. Towing-Tank Conference, vol.4, Ottawa, 1975**
13. *Salvesen, N.:* "Second Order Steady State Forces and Moments on Surface Ships in Oblique Regular Waves", **Intern. Symp. on The Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Wave, London 1974**
14. *Boese, P.:* "Eine einfache Methode zur Berechnung der Widerstandserhöhung eines Schiffes im Seegang", **IfS-Bericht Nr. 258, Feb. 1970**
15. *Faltinsen, O. M.; Minsaas, K. J., Liapis, N., Skjöldal, S.O.:* "Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway", **13-th ONR Symposium, Oct. 1978, Tokyo**
16. *Zhou, Y.:* "Beschreibung des Programmsystems BUEF6G", **IfS-Bericht Nr. 485, Juli 1988**
17. *Hampel, B.:* "Beschreibung des Programmsystems RERUD ", **IfS-Schrift Nr. 2358; "Beschreibung des Programmsystems SERV V", IfS-Schrift Nr. 2359, April 1986**
18. *Söding, H.:* "Bewegungen und Belastungen der Schiffe im Seegang", **Vorlesungsmanuskript Nr. 118, Sept. 1982**
19. *Söding, H.:* "Berechnung von Bewegungen, Relativbewegungen und Belastungen eines Katmarans im Seegang", **März 1982**

20. Blume, P.: "Zur Frage der erregenden Längskraft in von achtern kommenden regelmäßigen Wellen", **IfS-Bericht 334, 1976**
21. Söding, H.: "Berechnung der Bewegungen und Belastungen von SWATH-Schiffen und Katamaranen im Seegang", **Nov. 1987**
22. Söding, H.: "Manövrieren von Schiffen I", **Vorlesungsmanuskript Nr.13, Dez. 1980**
23. Söding, H.: "Bewertung der Manöviereigenschaften im Entwurfsstadium", **Jahrbuch der STG 78(1984)**
24. Lee, K. -Y.: "Ein Beitrag zur Berechnung der Widerstandserhöhung in von vorn kommenden Wellen", **IfS-Bericht Nr.431, Okt.1982**
25. Takahashi, T.: "A Practical Prediction Methode of Added Resistance of a Ship in Waves and the Direction of its Application to Hull Form Design", **Journal of the Naval Architects of West Japan, Vol. 75, 1987**
26. Söding, H.: "Lastannahmen bei der direkten Dimensionierung", **22. IfS-Fortbildungskurs, März 1986**
27. Hattendorff, H. G.: "Seeverhalten", **Handbuch der Werften, Bd., XII (1974)**
28. Söding, H.: "Influence of Course Control on Propulsion Power", **Schiff & Hafen, Juni 1984,63**
29. Blendermann, W.: "Zu den Kräften am schräg umströmten länglichen Objekt mit vollständiger Ablösung", **Schiffstechnik Bd. 35, 1988**
30. Schenzle, P.; Boese, P.; Blume. P.: "Ein Programm-System zur Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit unter Dienstbedingungen", **IfS-Bericht Nr. 303, Nov.1974**
31. Wagner, B.: "Untersuchung zur Frage des effektiven Zusatzwiderstandes durch den Wind auf der Grundlage von Modellversuchen für Unter- und Überwasserschiffe", **IfS-Bericht Nr. 286, März 1972**
32. Wagner, B.: "Windkräfte an Überwasserschiffen", **STG Jahrb. Bd. 61, 1967**
33. Nakamura, S.: "A Method for Predicting the Power of Ship in a Seaway", **Proceedings of 14th ITTC, 1975**
34. Zhou, Y.: "Beschreibung des Programmsystems SIS", **IfS-Schrift Nr. 2375, April 1989**